

6 海浜の変形機構の解析

6.1 海岸線の変化状況

6.1.1 Fongafale 島中央部

航空写真(上段、1984年撮影)と衛星写真(下段、2003年撮影、ECONOS)の比較によるFongafale島中央部の海岸線の変化を図6.1に示す。上段は、1984年の写真に緑線で2003年の海岸線を重ねたものである。これから、この約20年間では顕著な海岸線の変化がみられないことがわかる。

同様に1943年及び1941年の航空写真に2003年の海岸線を重ねたものを、図6.2に示す。これから、1943年の海岸線と2003年の海岸線の位置に顕著な差異は見られないものの、1941年から2003年にかけて海岸線は30m程度ラグーン側へ前進しており、1941年から1943年の間に変化したことが分かる。

これは、太平洋戦争時にツバルは対日戦線の最前線基地として使われ、米軍が環礁側のリーフや島内の一部を大規模に掘削し、この珊瑚の破砕片を主とした盛土材により、海岸や低湿地等を埋立て、空軍飛行場及び付帯施設の地盤を整備したことによる。

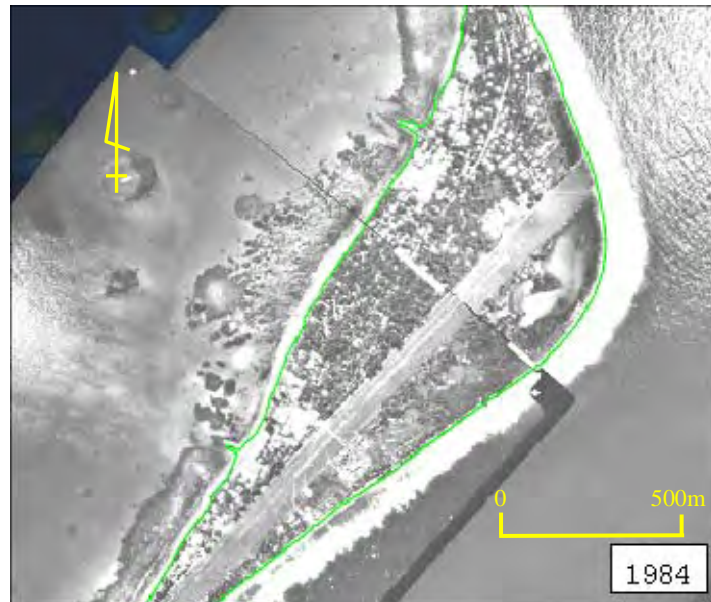


図 6.1 1984年から2003年の海岸線の変化

出典)COASTAL CHANGE ANALYSIS USING
MULTI-TEMPORAL IMAGE COMPARISONS –
FUNAFUTI ATOLL, April 2006, SOPAC

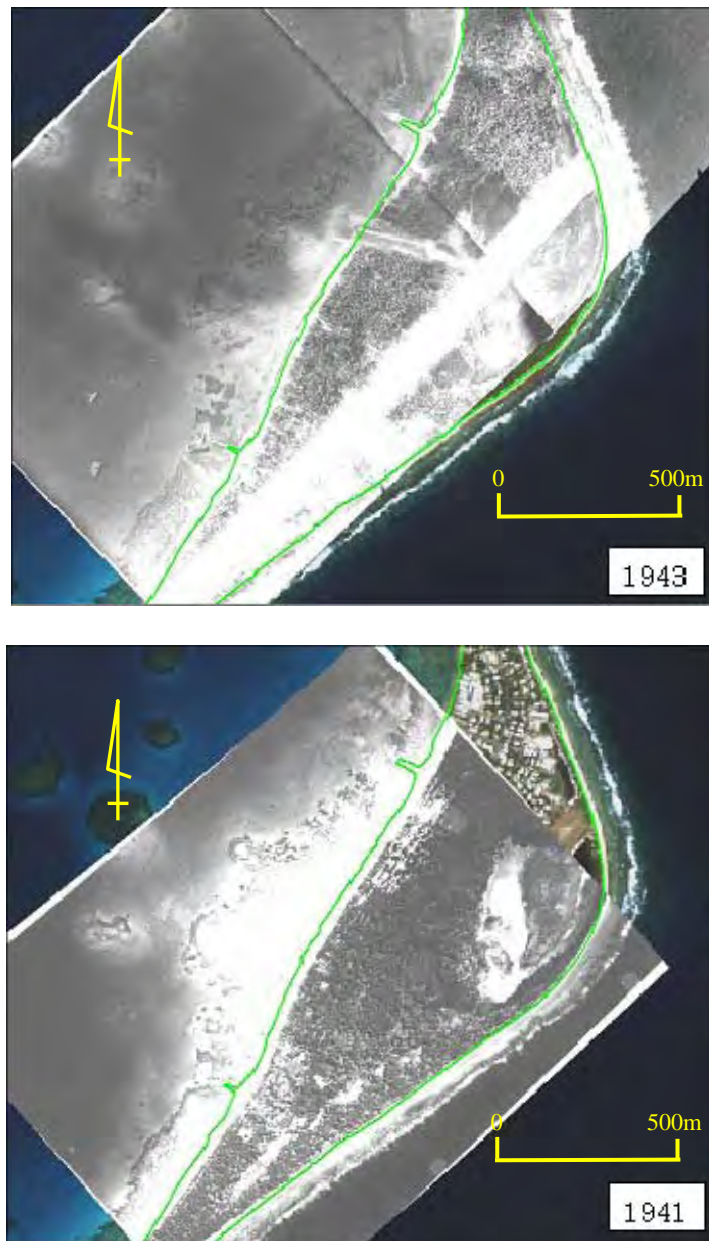


図 6.2 1941年及び1943年と2003年の海岸線の変化

出典)COASTAL CHANGE ANALYSIS USING MULTI-TEMPORAL
IMAGE COMPARISONS – FUNAFUTI ATOLL, April 2006, SOPAC

6.1.2 Tenkago 島北端

Tenkago 島北端の乾期及び雨期の海岸線の状況を表 6.1 に示す。この地点における季節別の風浪による波浪エネルギーフラックスは図 6.3 に示すとおりである。

これから、雨期に西風によりラグーン側の土砂が先端付近へ運ばれ、乾期にはこれらの土砂がラグーン側へ戻されることが推測される。また、外海からラグーン側への土砂の供給はあるものの、乾期に北端より外海を望んだ写真から判断して、その量は少なく、図 6.3 の上段に示す赤枠で示す範囲の土砂の一部が季節により移動しているものと考えられる。

表 6.1 Tenkago 島北端の海岸線の変化

	乾期	雨期
ラグーン側より北端を望む		
北端より外海側を望む		

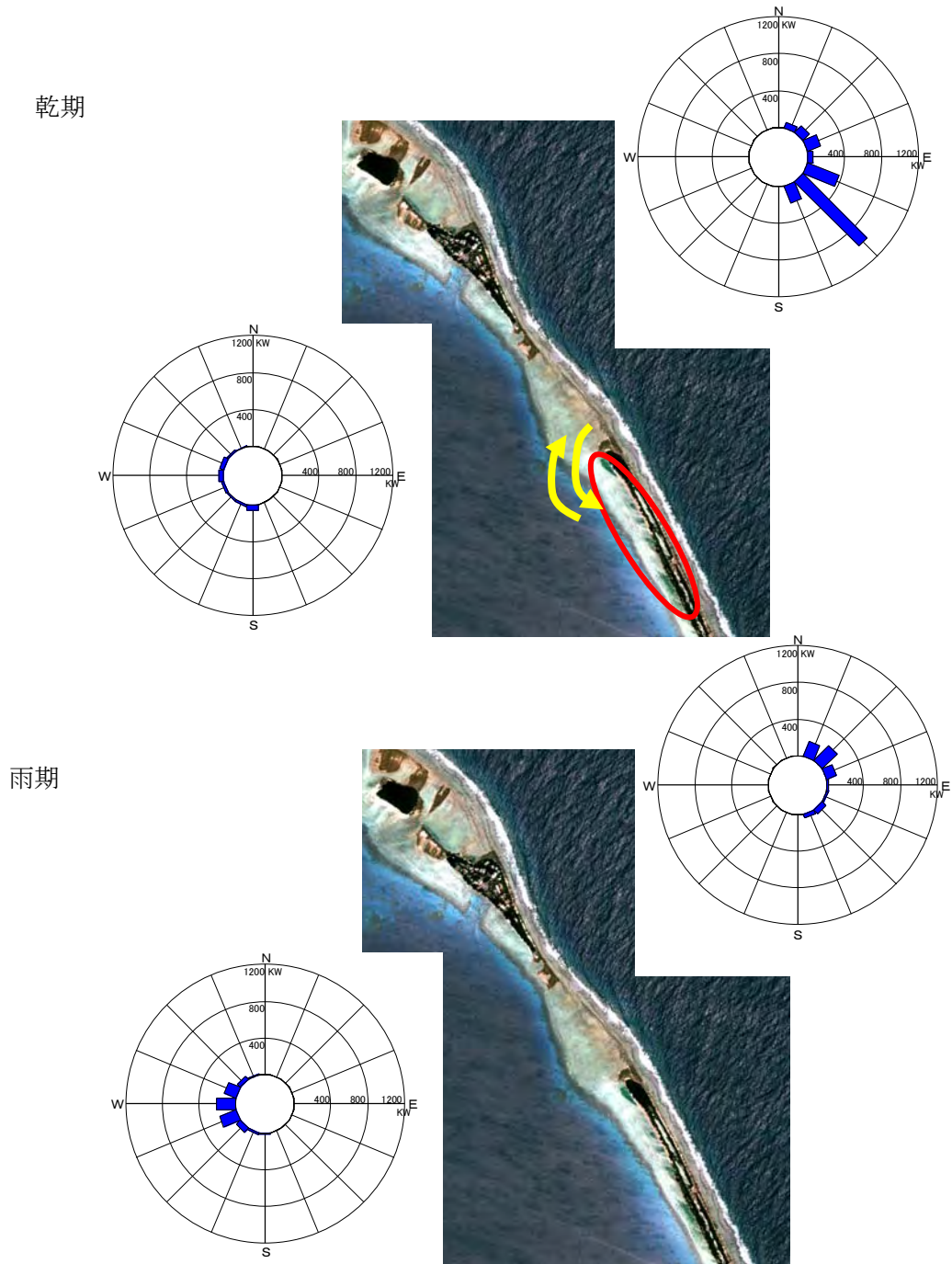




図 6.3 Tenkago 島北端部の波浪エネルギーフラックス

6.1.3 Fongafale 島南端

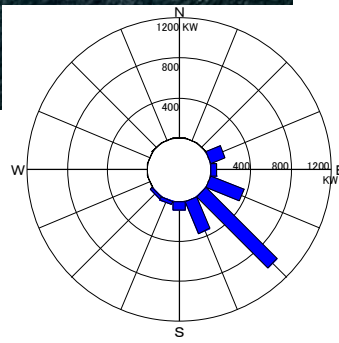
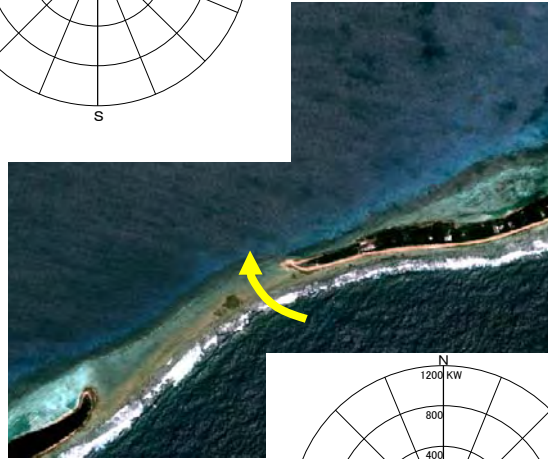
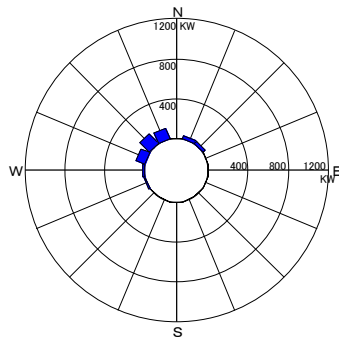
Fongafale 島南端の乾期及び雨期の海岸線の状況を表 6.2 に示す。この地点における季節別の風浪による波浪エネルギーフラックスは図 6.4 に示すとおりである。

これから、乾期には外海からの波浪の作用を受けて土砂がラグーン側へ押され、雨期は、ラグーン内で発達する北西からの風浪により、ラグーン側から外海へ土砂が押し出された様子が伺われる。

表 6.2 Fongafale 島南端の海岸線の変化

	乾期	雨期
先端の砂嘴の状況		
	ラグーン側へ偏向	外海側へ偏向

乾期



雨期

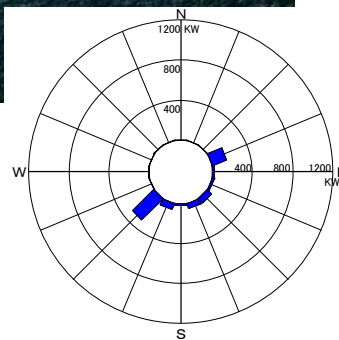
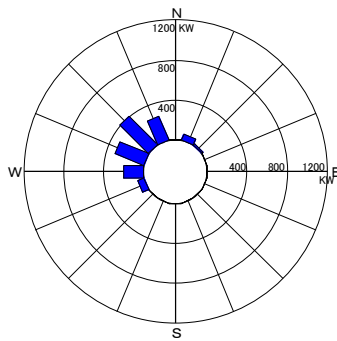


図 6.4 Fongafale 島南端部の波浪エネルギーフラックス

6.1.4 構造物周辺

沿岸漂砂の検討に有用な代表的な構造物及び特徴的な地形の位置を図 6.5 に示す。



図 6.5 代表的な構造物及び特徴的な地形の位置

(1) Funafuti 港新栈橋

Funafuti 港新栈橋周辺の乾期及び雨期の海岸線の変化状況を表 6.3 に示す。また、砂浜の分布をトータルステーションで計測した結果を図 6.6 に示す。

新栈橋の構造は護岸取り付け部以外が透過式となっていることを考慮すると、土砂の移動は、雨期は南側へ、乾期はほぼ中立と考えられる。



写真 6.1

表 6.3 Funafuti 港新栈橋周辺の海岸線の変化

	乾期	雨期
南側		
北側		

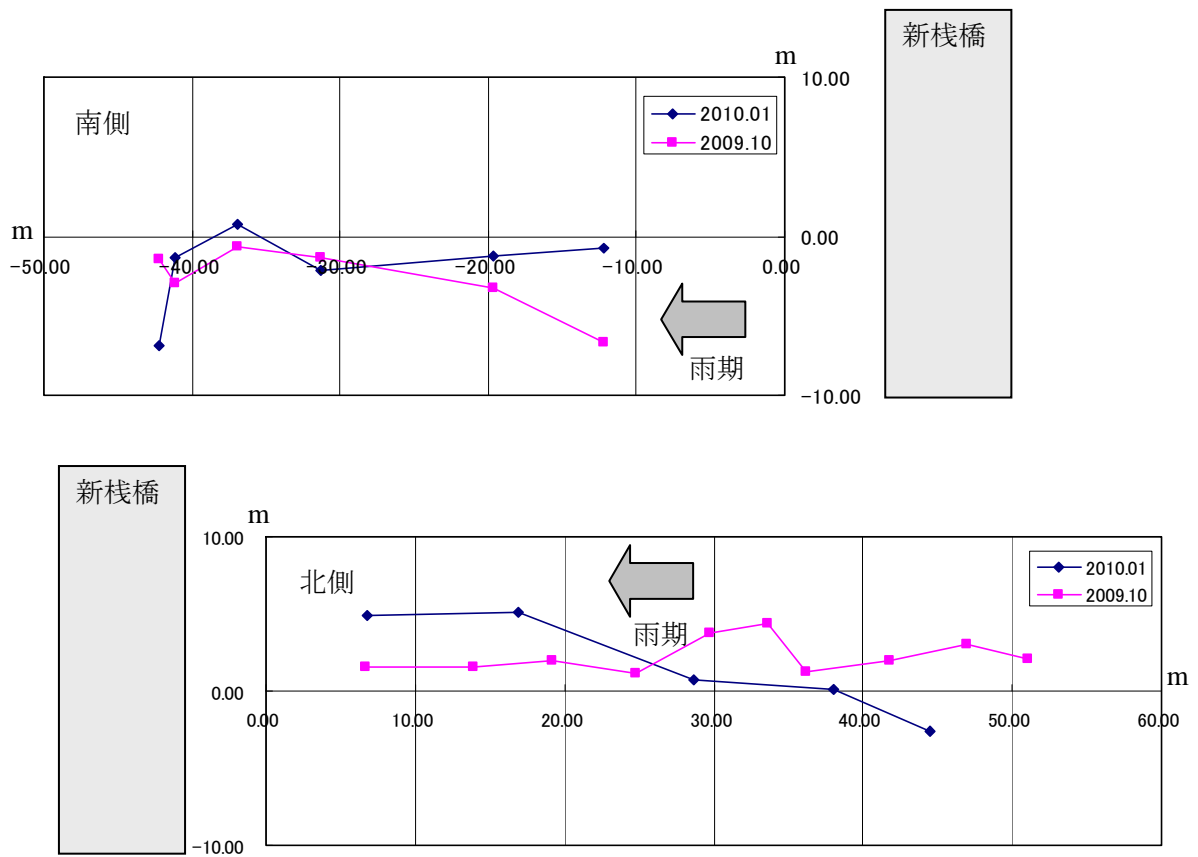




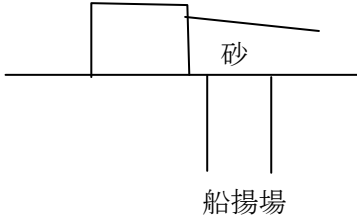
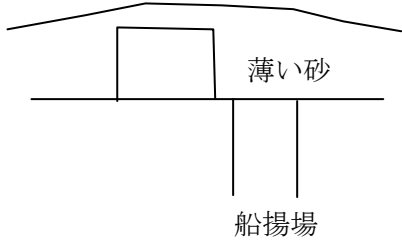
図 6.6 新栈橋周辺の海岸線の変化状況

(2) 病院前

病院前の船揚場周辺の乾期及び雨期の海岸線の変化状況を表 6.4 に示す。

乾期は、礫で囲った生簀状構造物の右岸側に砂が堆積しているものの、雨期は生簀状の構造物周辺に薄く広く砂が広がっており、雨期の漂砂が乾期に比べて活発な状況がうかがわれる。

表 6.4 病院前の海岸線の変化





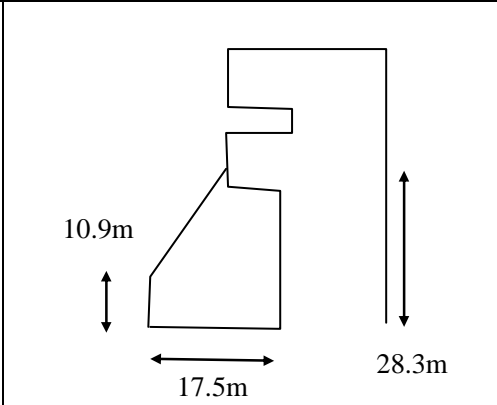
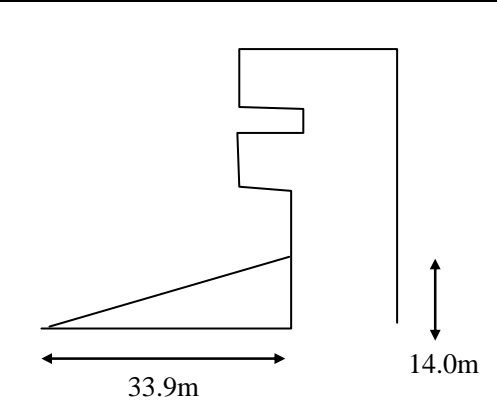
	乾期	雨期
写真		
模式図		

(3) 突堤

突堤周辺の乾期及び雨期の海岸線の変化状況を表 6.5 に示す。

土砂は乾期、雨期ともに南側に堆積し北側には見られない。南側の堆積分布から、乾期に突堤側へ堆積した土砂が雨期にはやや南側へ戻されている状況がうかがわれる。

表 6.5 突堤周辺の海岸線の変化





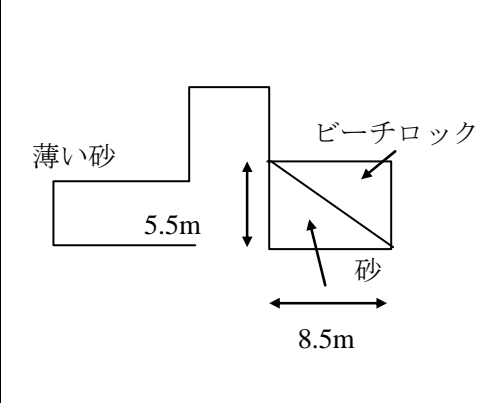
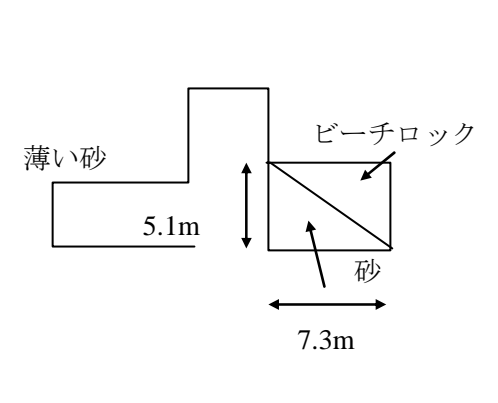
	乾期	雨期
南側		
北側		
模式図		

(4) 船揚場

船揚場周辺の乾期及び雨期の海岸線の変化状況を表 6.6 に示す。

砂の堆積は、船揚場の南側の方が北側に比べてやや多くみられるが、乾期、雨期ともにビーチロックの上に薄く載っている程度であり、沿岸漂砂として供給される土砂が少ないため、季節による顕著な違いは見られない。

表 6.6 突堤周辺の海岸線の変化



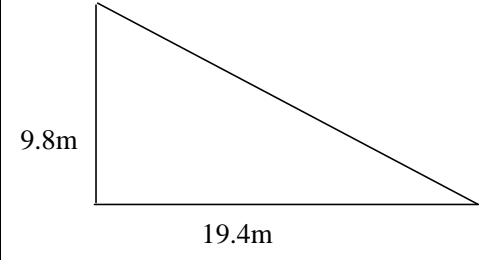
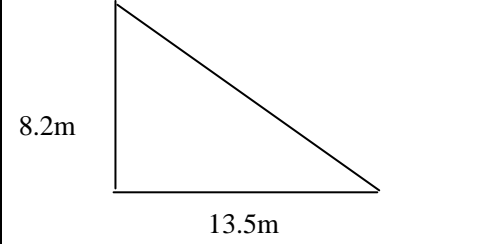
	乾期	雨期
南側		
北側		
模式図	 <p>薄い砂</p> <p>5.5m</p> <p>ビーチロック</p> <p>砂</p> <p>8.5m</p>	 <p>薄い砂</p> <p>5.1m</p> <p>ビーチロック</p> <p>砂</p> <p>7.3m</p>

(5) 岬背後

岬背後の乾期及び雨期の海岸線の変化状況を表 6.7 に示す。

砂の堆積は、乾期と比較して、雨期の規模がやや小さくなっている。

表 6.7 突堤周辺の海岸線の変化

	乾期	雨期
写 真		
模式図	 <p>9.8m 19.4m</p>	 <p>8.2m 13.5m</p>

6.2 海浜の変形機構

6.2.1 外海側

風資料の観測地点を図 6.7 に赤丸で示す。この資料を基に、SMB 法でピンク色の地点の波浪推算を行った。外海側は「うねり」が入ってくるため、SMB 法による波浪推算では十分な評価が困難であるが、海浜の変形機構を検討するための指標とした。推算結果は、波浪エネルギーフラックスの方向別分布として、乾期及び雨期に分けて図 6.8 および図 6.9 に示す。

これから、乾期は図 6.8 のベクトルで示すように Fongafale 島中央部の東へ突出した地点を境に南側では、南向き、北側では北向きに土砂移動を引き起こす外力下にあることが推測される。一方、雨期は乾期に比べて波浪エネルギーは小さく、図 6.9 のベクトルで示すように Fongafale 島の北側で南向きの土砂移動を引き起こす外力下にあるものと推測される。

しかしながら、外海側の海岸は主に硬いビーチロックとこれが砕け岸側に打ち寄せられたレキで構成されており、Fongafale 島の南端を除いて、顕著な変化がみられないため、土砂収支は南端の砂嘴を形成させる程度で、珊瑚やビーチロックが波浪で砕け海岸へ供給される量と沿岸漂砂として流出する量は、ほぼバランスしているものと考えられる。

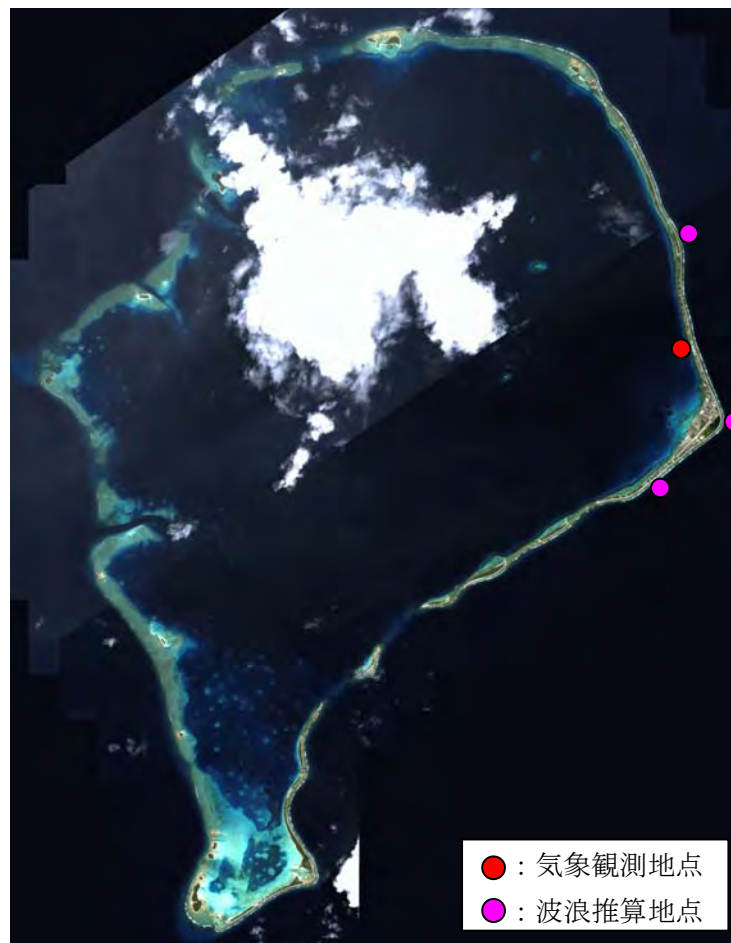


図 6.7 外海側波浪推算地点

乾期 3月～10月

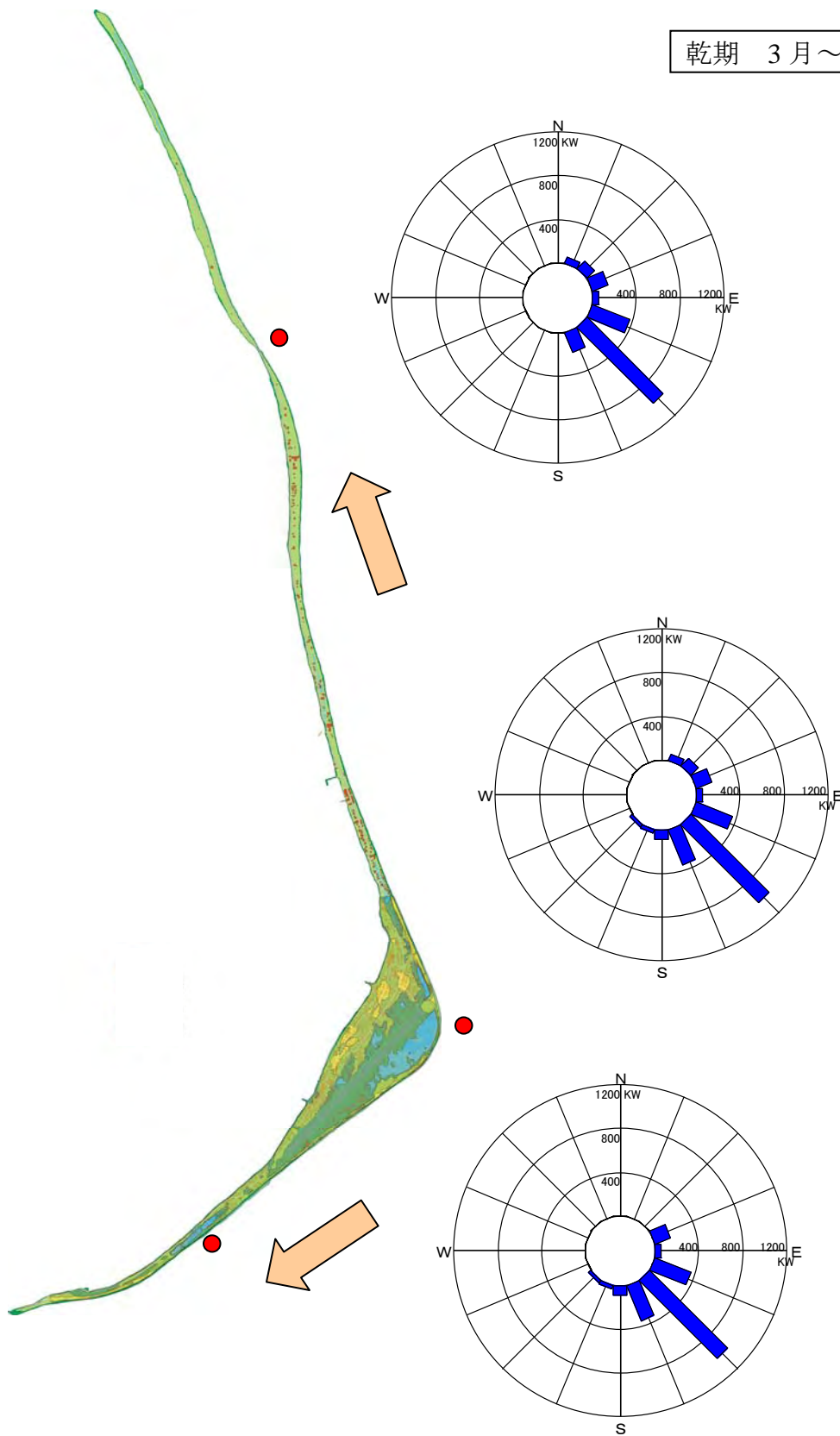


図 6.8 外海側波浪エネルギーフラックスの分布(乾期)

雨期 11月～2月

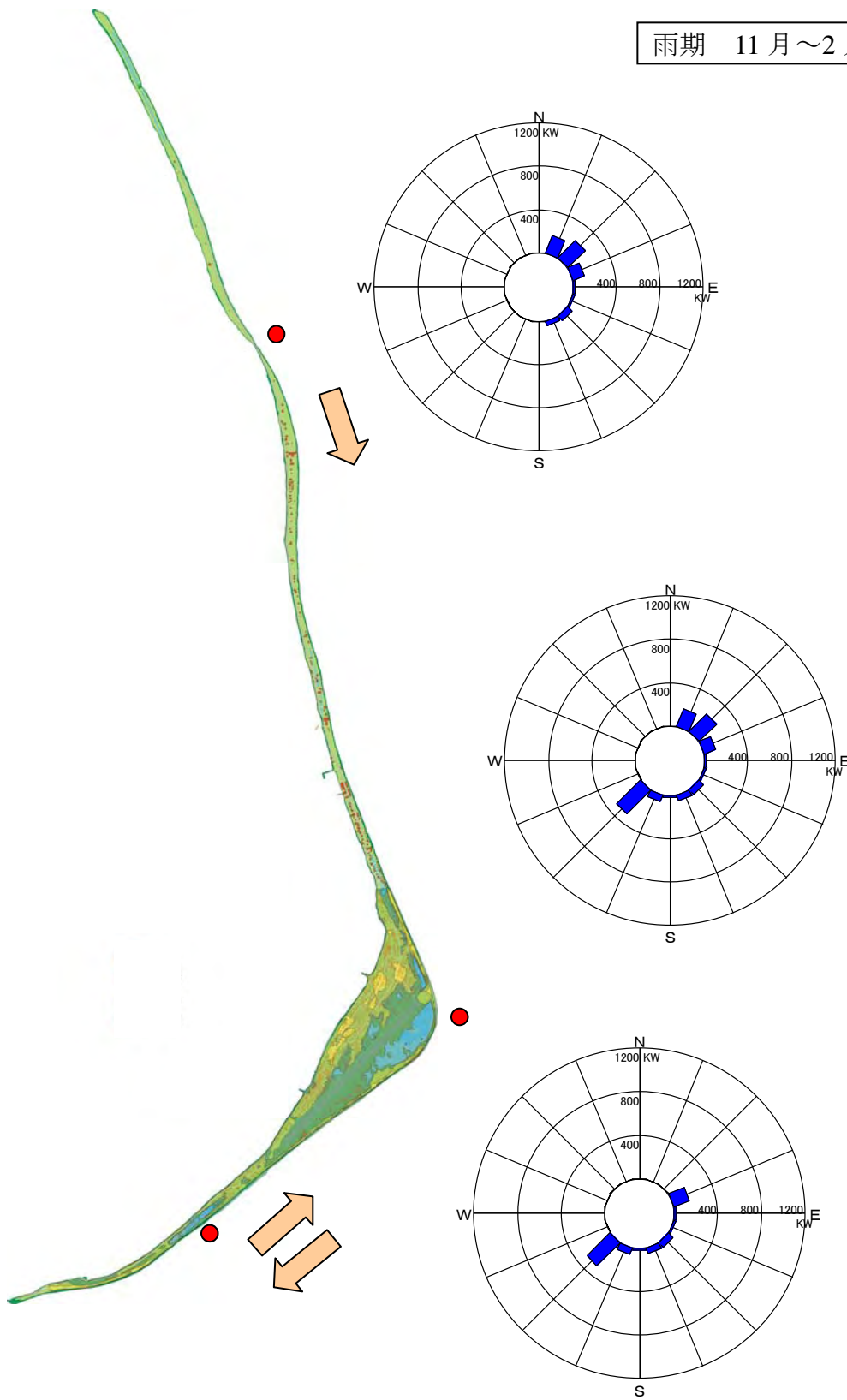


図 6.9 外海側波浪エネルギーフラックスの分布(雨期)

6.2.2 ラグーン側

風資料の観測地点を図 6.10 に赤丸で示す。この資料を基に、SMB 法でピンク色の地点の波浪推算を行った。

推算結果は、波浪エネルギーフラックスの方向別分布として、乾期及び雨期に分けて図 6.11 および図 6.12 に示す。

これから、乾期は図 6.11、図 6.12 のベクトルで示すように乾期、雨期ともにフォンガファレ島中央部へ土砂移動を引き起こす外力下にあることが推測され、乾期に比べて雨期の方がそのポテンシャルが大きいことが推測される。

しかしながら、海岸は一部に砂浜が形成されているが、主に硬いビーチロックとこれが砕け岸側に打ち寄せられたレキで構成されており、海岸地形の季節変化は若干見られるものの、海岸構造物が設置されている海岸周辺では構造物により漂砂が遮断されることによる著しい侵食や堆積が生じているところはほとんど見られない。これらのことから、漂砂を引き起こすポテンシャルはあるものの沿岸漂砂量は比較的少ないと考えられる。

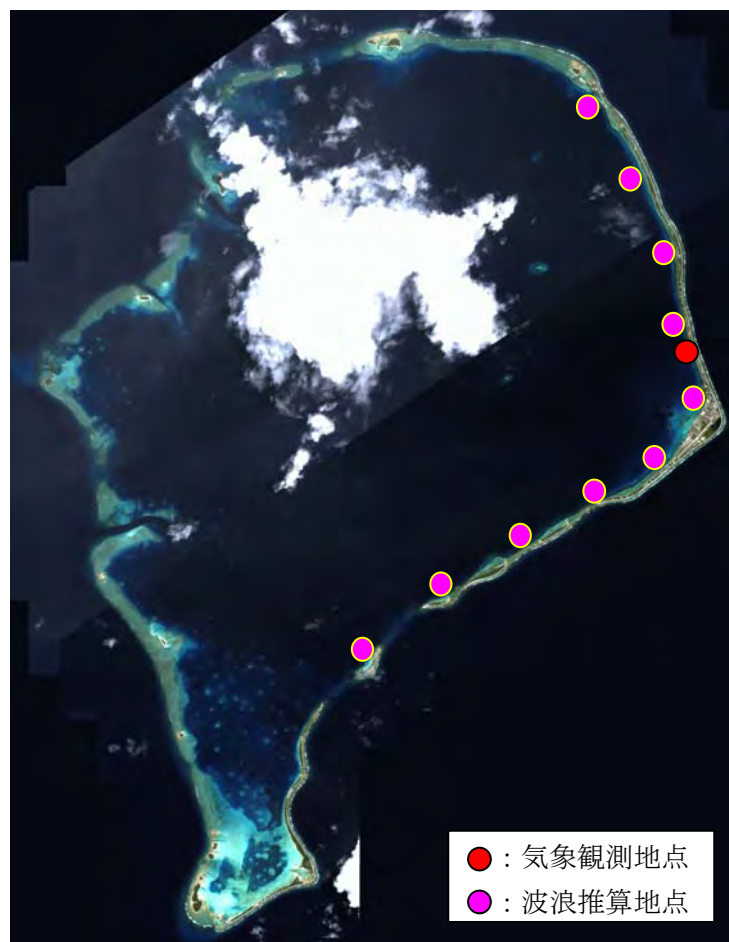


図 6.10 ラグーン側波浪推算地点

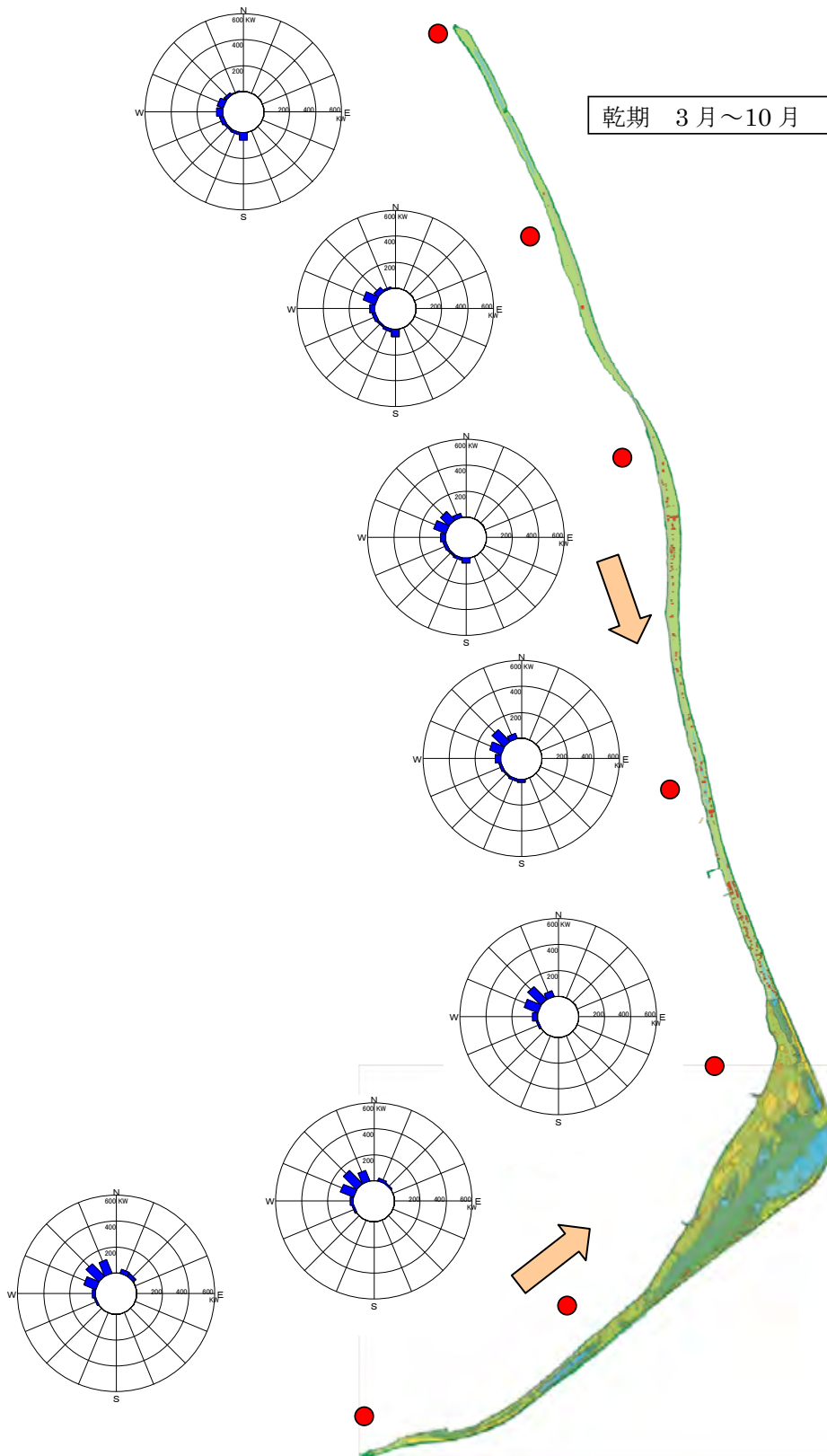


図 6.11 ラグーン側波浪エネルギーフラックスの分布(乾期)

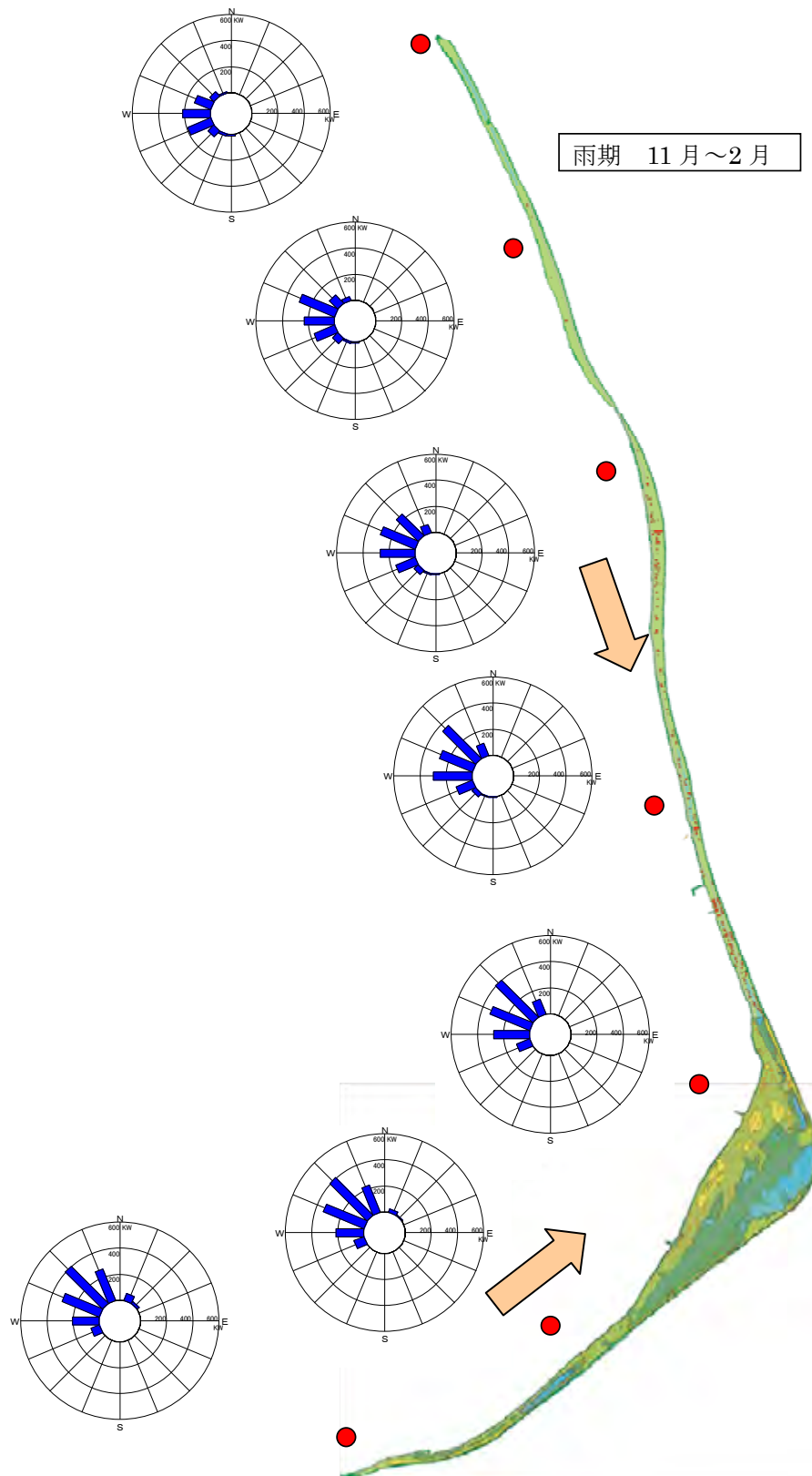


図 6.12 ラグーン側波浪エネルギーフラックスの分布(雨期)

6.3 沿岸漂砂量

6.3.1 ラグーン側

沿岸漂砂量は、海岸構造物の上手側に堆積した土砂量や港内に堆積した埋没量の実測値から算定するか、漂砂量算定式を用いて波浪エネルギーフラックスに漂砂量係数を乗じて算定するのが一般的である。しかしながら、本調査地域では、周辺海岸へ影響を与えるほどの構造物が少ないことや海岸構造物周辺の地形変化量を把握するデータがないため実測値から算定することが困難である。漂砂量算定式を用いる場合は、底質の粒径等の性状により異なる漂砂量係数を設定する必要があるが、本調査地域の底質は、ビーチロックやこれらが砕けたレキが主体であり、これらに適用する係数が未知であること、更に、沿岸漂砂として移動する底質が少ないため適用が困難である。

従って、ラグーン側において SMB 法により算定した波浪データから沿岸方向の波浪エネルギーフラックスを算定し、沿岸漂砂として移動できる底質が存在すれば輸送させるポテンシャルとして沿岸漂砂量を評価した。ここで、沿岸漂砂量は波浪エネルギーフラックスに比例するため、雨期の北端境界を-1.0として無次元化した。負の値は南向きの沿岸漂砂量を表すものとする。

さらに、代表的な区間について無次元化された沿岸漂砂ポテンシャルの収支を算定し、侵食条件にあるか、堆積条件にあるか評価した。算定結果は、図 6.13 および図 6.14 に整理した。

これから、乾期、雨期ともに Tenkago 島から Fongafale 島中央部までの沿岸漂砂の向きは南向きであり、その量は Funafuti 港付近にかけて徐々に大きくなると推測された。また、フォンガファレ島中央部から南端にかけては、沿岸漂砂は北向きであり、南にいくに従いその量は小さくなり、雨期の方が乾期に比べて大きいと推測された。

土砂収支の結果は、Fongafale 島中央部は堆積条件下、その他は侵食条件下にあり、乾期に比べて雨期の方がその影響が大きいと推測された。

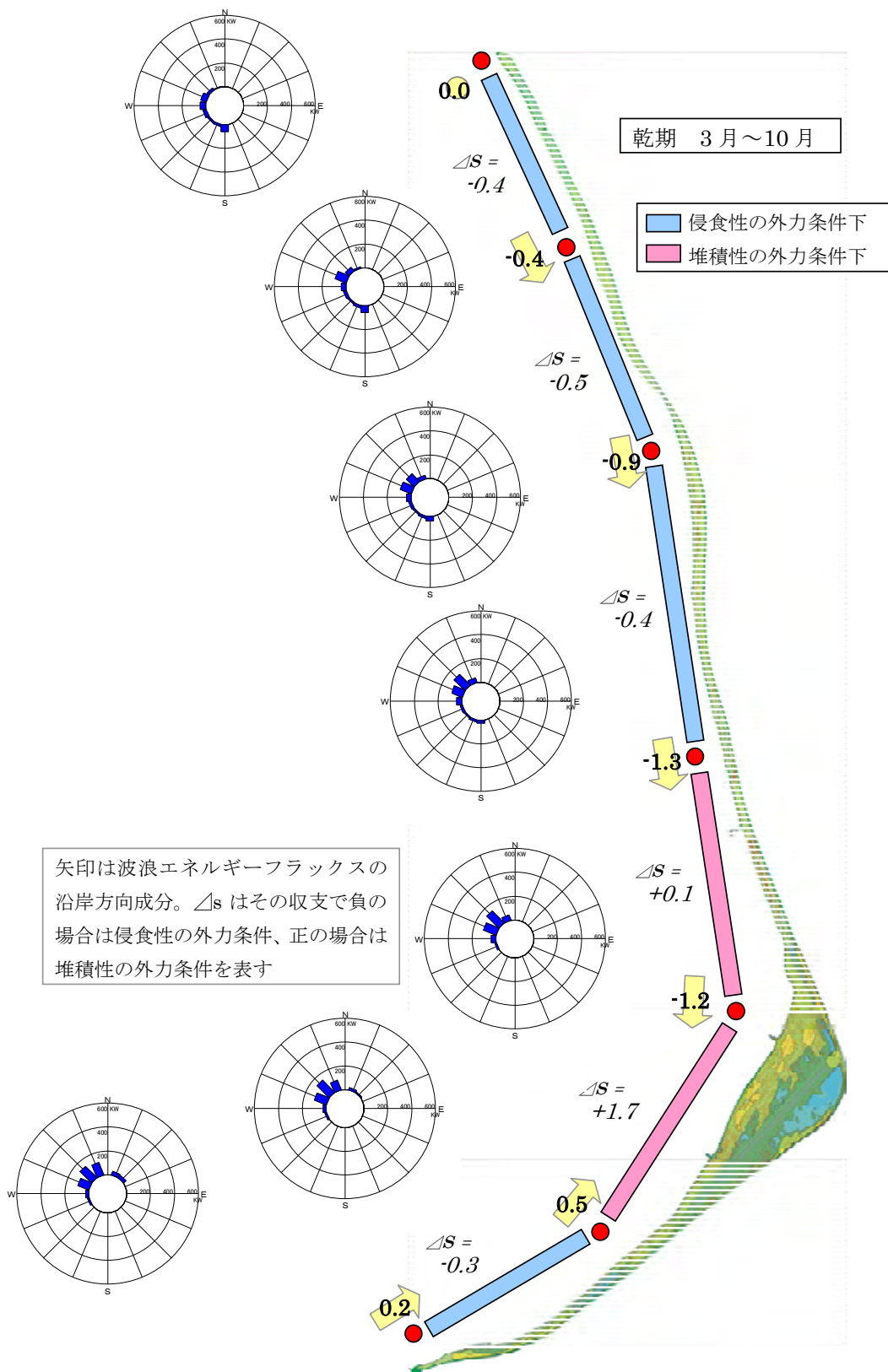


図 6.13 ラグーン側の土砂収支(乾期)

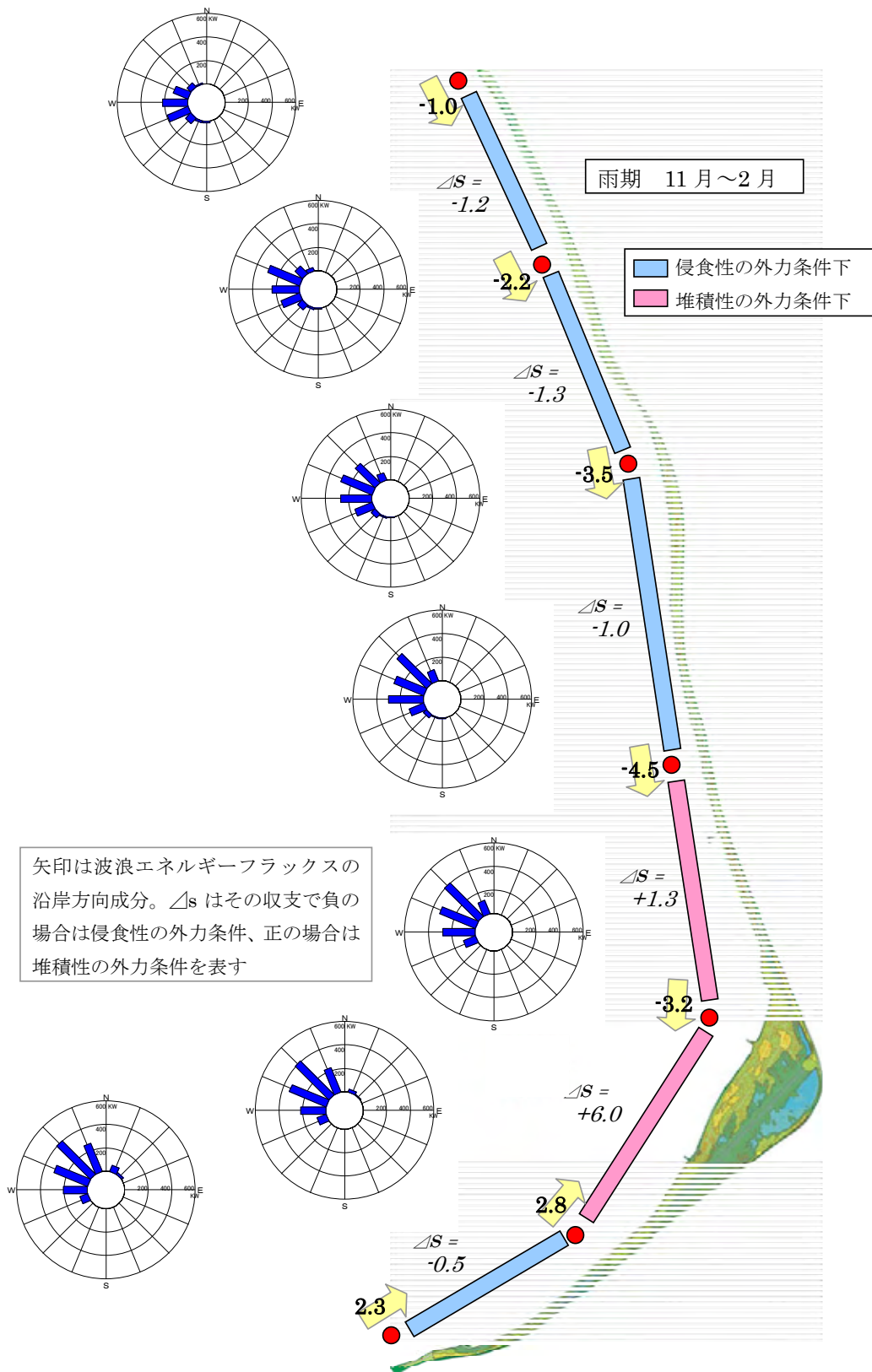


図 6.14 ラグーン側の土砂収支(雨期)

6.3.2 外海側

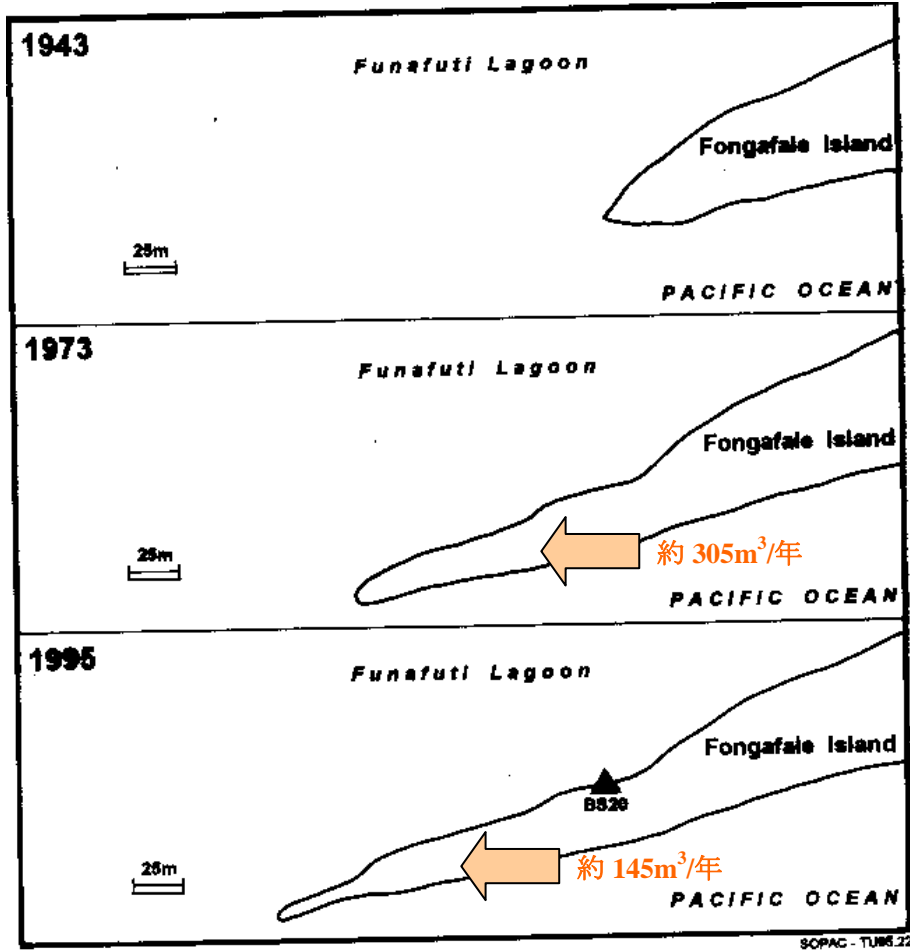
外海側の波浪は、「うねり」が入ってくるため、風資料から評価することが困難なこと、さらに、外海側には海岸構造物がなく、顕著な地形変化は、Fongafale 島南端の伸長を除いて見られないため、南端以外の沿岸漂砂量は少ないものと推測される。

これらのことから、外海側の有意な沿岸漂砂は Fongafale 島中央部から南端にかけて存在し、その量は砂嘴の成長量から推定することとした。

図 6.15 に 1943 年、1973 年及び 1995 年の Fongafale 島南端の砂嘴形状の変遷を示す。この砂嘴を形成している土砂は、外海側の波浪により Fongafale 島中央部から南側にかけての海岸を供給源とする土砂であると考えられるので、概ね外海側 Fongafale 島南部の沿岸漂砂量と考えることができる。

1943 年、1973 年及び 1995 年の平面積は、図上からそれぞれ約 $4,557\text{m}^2$ 、 $8,215\text{m}^2$ 、 $9,486\text{m}^2$ と見積もれる。土砂が移動する高さを断面図から 2.5m と見積もると、1943-1973 年及び 1973-1995 年に堆積した土砂量は、それぞれ約 $(8,215-4,557) \times 2.5=9,145\text{m}^3$ 、 $(9,486-8,215) \times 2.5=3,177.5\text{m}^3$ となり、年間当たりの土砂量は、約 305m^3 と約 145m^3 となる。

次に、2005 年の衛星写真と 2010 年 2 月に現地でハンディ GPS により測定した結果を比較すると、平面積は図上から約 $1,185\text{m}^2$ の増加と見積もれる。土砂の移動高を同様に 2.5m とすると 2005-2010 年に堆積した土砂量は、約 $2,960\text{m}^3$ となり、年間当たり約 590m^3 となる。潮位補正等推定精度に問題はあるものの外海側 Fongafale 島南側の沿岸漂砂量は、年間数百 m^3 程度あるものと推定される。



出典) COASTAL SEDIMENTATION AND COASTAL MANAGEMENT OF FONGAFALE, FUNAFUTI ATOLL, TUVALU

図 6.15 Fongafale 島南端の砂嘴の変遷

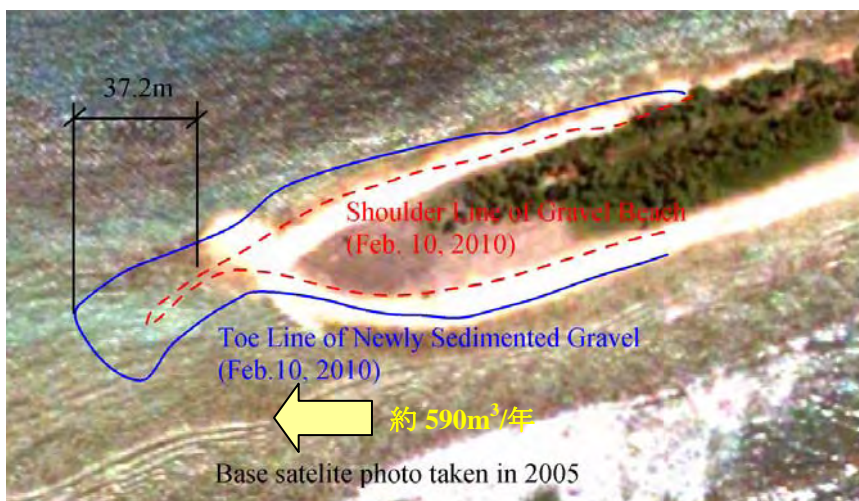


図 6.16 Fongafale 島南端部の礫の滞積による延伸

(2005 年衛星画像と 2010 年 2 月 10 日の比較)

出典: SOPAC Technical Report 221 (Sept. 1995)

7 海岸防護・再生計画の基本計画

7.1 海岸保全区域及び防護ライン

7.1.1 海岸保全区域の設定

(1) 海岸保全区域設定の考え方

海岸保全区域の選定にあたっては、背後地に重要なインフラ(庁舎、病院、学校、主要道路等)があり、人口密集度が高い地域において選定の優先度を高くした。

(2) 対策を必要とする地域の選定方法

現地踏査、海岸災害に関するアンケート調査結果及び背後地の状況等から対策を必要とする地域を選定した。次に、アンケート調査で抽出された越波の被害地域を中心に、越波状況実態調査を行い、対策地域をさらに絞り込んだ。

(3) 海岸保全区域の設定

海岸保全区域は、海岸災害から海岸を防護するために必要な区域である。そこで、先ず海岸保全区域を設定するために、現地踏査、アンケート調査結果及び越波状況実態調査結果を基に、対象区域を 6 地区に区分するとともに、各地区についてラグーン側と外海側に分けて海岸の状況、背後地の状況、海岸災害の状況等について整理した。これらの整理結果を基に、海岸保全区域の指定の必要性について検討し、その結果を表 7.1 に示す。これらの結果から、図 7.1 に示すように海岸保全区域を設定した。ここで、T 地区と A 地区における海岸(ラグーン側及び外海側)、そして D 地区における外海側の海岸については、海岸災害(越波、浸水)の情報が少なく、人家も少ないことから、海岸保全区域の対象から除外した。

表 7.1 海岸保全区域に指定に関する検討地域の状況

検討地域	Tengako Islet (T)		North Part in Lofeagai Area (A)		South Part in Lofeagai Area (B)		Fakai Fou Area (C)		Center Part in Fongafale (D)		Kavatoetoe Area (E)		
	Lagoon Side	Ocean Side	Lagoon Side	Ocean Side	Lagoon Side	Ocean Side	Lagoon Side	Ocean Side	Lagoon Side	Ocean Side	Lagoon Side	Ocean Side	
海岸の状況													
背後の状況													
	北部のゴミ処分場まで道路はあるものの家屋等は極めて少ない。		Tenkago島とFongafale島を結ぶ道路はあるものの家屋等は少ない。		家屋はラグーンと道路を挟んで点在する。		家屋はラグーンと道路を挟んで連続的に存在する。Funafuti港とFongafale島中央部を結ぶ道路がある		政府機関や学校、病院等の公共施設が海岸に隣接。		政府機関や発電所等が滑走路に沿って点在する。		
被害の状況	顕著な被害はない(アンケート調査による)。	顕著な被害はない(アンケート調査による)。 ストームリッジの一部でBreachingや崩壊が起こっている。	一部浸水被害が起こっている(アンケート調査による)。 越波実態調査では、越波は確認されなかった。	顕著な被害はない(アンケート調査による)。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。 越波実態調査でも越波を起している箇所が数箇所確認された。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。 越波実態調査でも越波を起している多数確認された。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。 越波実態調査でも越波を起している箇所が多数確認された。	顕著な被害はない(アンケート調査による)。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。 越波実態調査でも越波を起している箇所がほんの少し確認された。	浸水と越波災害が起こっている(アンケート調査による)。	
海岸保全区域指定について	—	—	—	—	指定する	指定する	指定する	指定する	指定する	—	指定する	指定する	
備考	ストームリッジの背後にあるボロービットについて、EUによるボロービットの埋め戻しプロジェクトが進行中である。このプロジェクトにより、ストームリッジの補強が期待されることから、本プロジェクトでは対策の検討対象外とした。		家屋が少なく、海岸災害(越波、浸水)被害も少ないことから、対策の検討対象外とした。		家屋は比較的多く、浸水、越波災害が起こっており、対策の検討対象区域とした。						家屋が少なく、海岸災害(越波、浸水)被害も少ないことから、対策の検討対象外とした。		浸水と越波災害が起こっており、対策の検討対象区域とした。

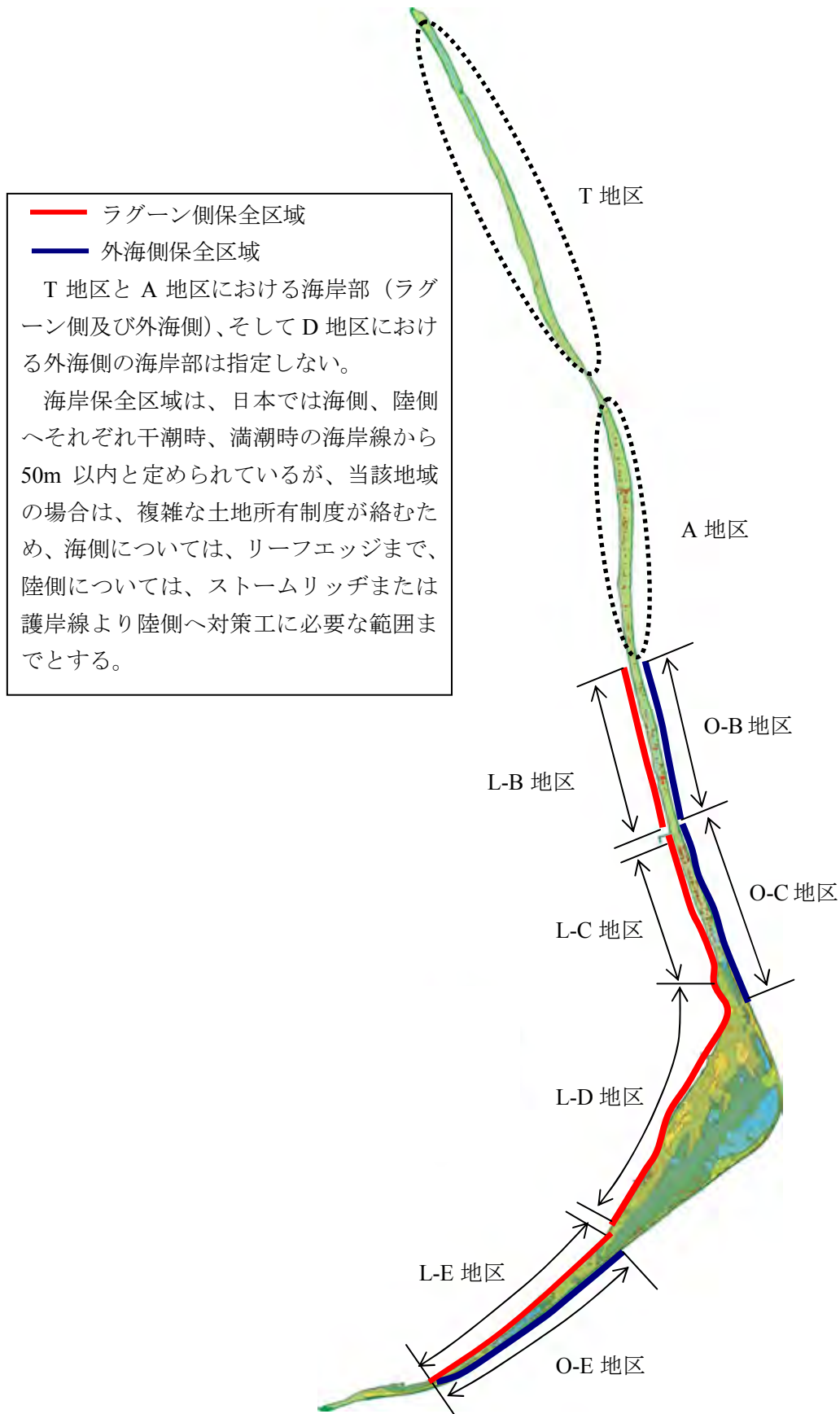


図 7.1 海岸保全区域の設定

7.1.2 防護ラインの設定

(1) 防護ライン設定の考え方

侵食や浸水から人命財産を守るべき範囲の海側境界を定め、海岸堤防の法線位置や侵食対策の目標を明確にする必要があることから、守るべき陸域境界線を防護ラインとして定める。防護ラインは、地形特性、背後地の現在及び将来における土地利用、海岸の利用状況、自然環境等を検討して設定する。

(2) 防護ラインの設定

海岸線に構造物がない場合と護岸等の構造物がある場合の防護ラインを図 7.2 に示す。

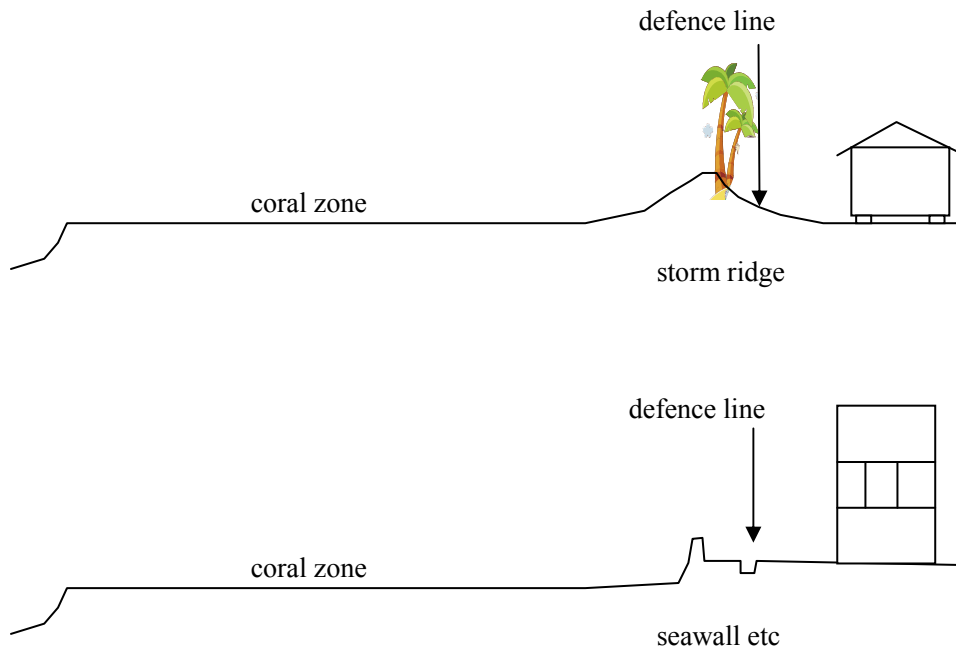


図 7.2 防護ラインの設定

7.1.3 緊急整備必要性の順位付け

上記で指定した海岸保全区域における緊急整備の必要性について、海岸災害の状況及び背後地の状況等から、表 7.2 のように整理した。緊急整備の優先度は、政府機関や学校等の重要な公共施設のある Fonagafale 島中央部の L-D 地区が最優先となり、次に Funafuti 港と Fonagafale 島中央部を結ぶ道路のある L-C 地区が高い結果となった。

表 7.2 海岸保全区域における緊急整備必要性の順位付け

検討地域		災害の状況 上段: アンケート結果 下段: 越波実態調査結果	背後地の状況	重要度	緊急度
B地区	L-B地区 ラグーン側	浸水と越波災害 越波被害 中	家屋はラグーンと道路を挟んで点在。	家屋は少ないが、学校やゴミ処分場へ通じる道路があるため、優先度はやや高い。	3
	O-B地区 外海側	浸水と越波災害(アンケート調査による)。	ストームリッジの背後に家屋が点在。	家屋が少ないことから優先度は低い。	
C地区	L-C地区 ラグーン側	浸水と越波災害 越波被害 大	家屋はラグーンと道路を挟んで連続的に存在。Funafuti港とFongafale島中央部を結ぶ道路がある。	家屋が連続的に存在しFunafuti港とFongafale島中央部を結ぶ道路があることから優先度は高い。	2
	O-C地区 外海側	浸水と越波災害(アンケート調査による)。	storm ridgeを切り崩して人家が建てられている。更に、人家の背後はborrow pit後の池となっている。	危険な箇所へ人が進出したり、ストームリッジを削って家屋の資材にして災害を招いていることは否めないが越波災害の危険度が高い。	
D地区	L-D地区 ラグーン側	浸水と越波災害 越波被害 中	政府機関や学校、病院等の公共施設が海岸に隣接。	基本方針に示されるように重要な公共施設があるため優先度は高い。	1
	L-E地区 ラグーン側	浸水と越波災害 越波被害 小	道路を挟んで家屋が点在。	家屋が少ないことから優先度は低い。	
E地区	O-E地区 外海側	浸水と越波災害(アンケート調査による)。	ストームリッジの背後に家屋が点在。	家屋が少ないことから優先度は低い。	4

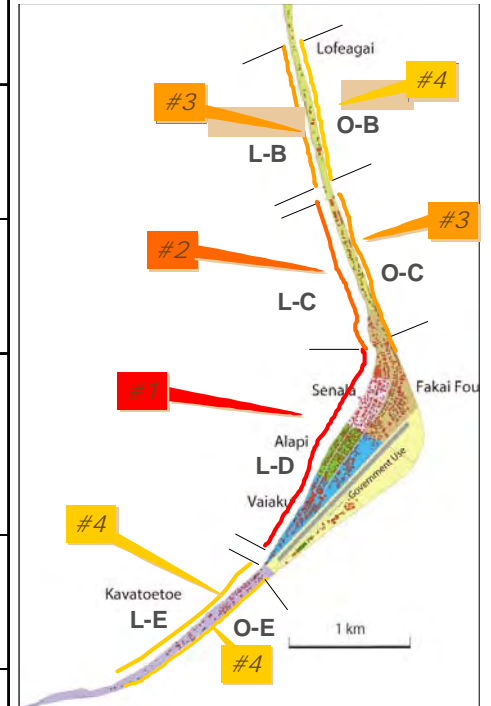


図 7.3 検討地域

7.2 対策工法の選定方針と比較検討

7.2.1 海外における海岸保全対策の動向

諸外国ではその国の自然環境や歴史的な経緯など、それぞれの国特有の事情を反映し、海岸保全対策に取り組んでいる。ここでは、海岸保全対策に関する主要先進国の例および最近の国際的な海岸管理の動向について、以下に述べる。

(1) アメリカの海岸保全対策

第二次世界大戦以前のアメリカにおける海岸保全対策（海岸浸食対策や高潮対策等）は、他の国と同様に、突堤や護岸、堤防などの構造物が主流であった。その後、海浜や砂浜が持

つ防災機能が見直され、これらを利用した対策の方がより経済的かつ機能的であることが認識されるようになった。図 7.4 に示すように、1960 年代以降、アメリカ合衆国連邦政府による海岸保全対策の事業費の約 90%は養浜事業となっており、構造物による対策から養浜による対策に移行してきている。

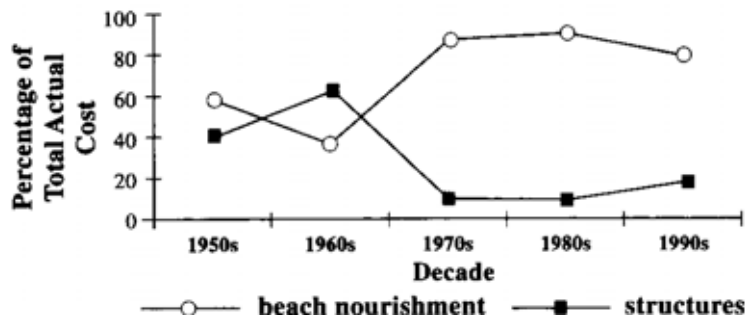


図 7.4 アメリカにおける海岸保全対策工の変遷

出典 ; Institute for Water Resources (1996): Analysis of the U. S. Army Corps of Engineers Shore Protection Program, IWR Rep. 96-PS-1.

(2) オランダの海岸保全対策

オランダは、国土が狭い上にその 1/4 が海抜 0m 以下にあり、これらを取り囲むようにして海岸線に砂丘が発達している。1980 年以前は、侵食対策として突堤などを設置するとともに、堤防の建設が行われていた。その後、1984 年に砂丘の安全性を評価するための指針 (TAW: Guide to the assessment to the safety of dunes as a sea defense) が発行されて以来、浚渫の副産物としての砂の利用価値が高まり、砂丘を保全するための養浜事業が重要視されるようになってきた。

(3) デンマークの海岸保全対策

デンマークは、世界最大の島であるグリーンランドを除けば、ジールランド (Sealand)、フン (Funen) 島およびユトランド (Jutland) 半島を加えて、約 44,000 km² の国土に 500 の島を持ち、そのうち約 200 の島が有人島である。海岸線の長さは約 7,300 km である。特に、ユトランド半島中央西海岸は、侵食が激しく、高潮や高波浪に対する国土保全の観点から、海岸砂丘や土堤 (dike) の強化が必要とされたことから、砂丘前面への人工砂丘の建設や養浜による海浜幅の拡張が活発に行われている。

デンマークの海岸保全対策は、図 7.5 に示すように、これまで突堤、海岸堤防 (土堤)、人工砂丘、離岸堤の建設が行われたが、1982 年以降ハードストラクチャーの施工を減らして、養浜事業が増加している。

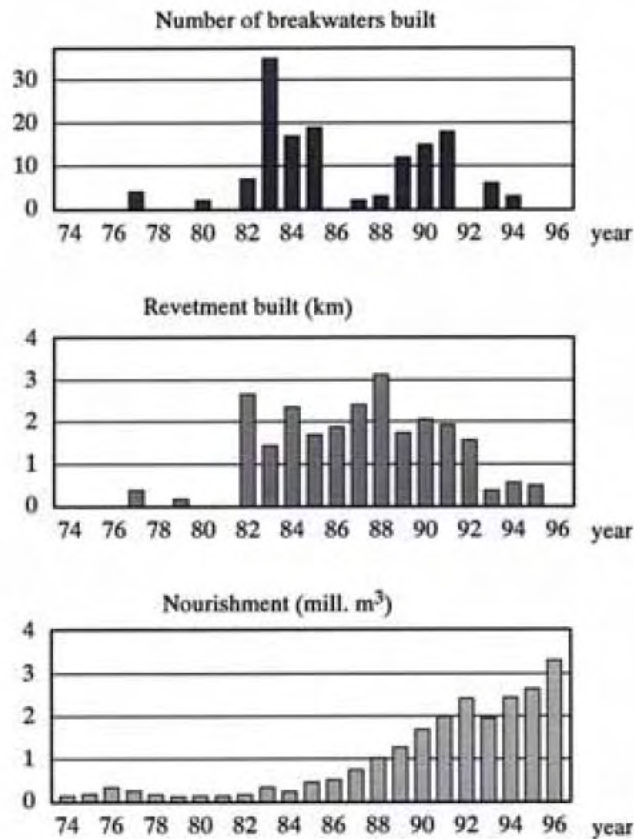


図 7.5 デンマークにおける海岸保全対策工の変遷

出典 ; Christian Lastrup and Holger Toxvig Madsen (1998): Evaluation of the effect of 20 years of nourishment, Danish Coastal Authority.

(4) 国際社会における海岸管理の動向

総合的沿岸域管理 (Integrated Coastal Management, ICM) は、国家における沿岸域や海洋に対する管理の中心的な概念として、1992 年に開催された国連環境開発会議を契機に国際社会の中で強く認識されるようになった。この会議で採択されたアジェンダ 21 の第 17 章では、特に海洋と沿岸域の管理に対して新しい取り組みの必要性が強調されており、主要なプログラムとして以下の 7 つのものがある。

- ・ 排他的経済水域を含む沿岸域の持続可能な開発と総合的管理
- ・ 海洋環境保護
- ・ 公海における海洋生物資源の保護と持続可能な利用
- ・ 領海内における海洋生物資源の保護と持続可能な利用
- ・ 海洋環境と気候変動の管理における不確実性への対応
- ・ 国内および国際的な協調と調整の強化
- ・ 島嶼の持続可能な発展

なお、アジェンダ 21 では、ICM の必要性や取り組みの方向性が示されているものの、他

の条約協定書と同様に、ICM 概念の解釈、実施に関しての具体的な議論が欠如していると言われている。その後、沿岸域管理に関する研究と実践経験が蓄積されるとともに、沿岸域における気象変動と海面上昇の長期的な影響への懸念が増してきた。このような背景を受けて、1997 年に「International Workshop: planning for Climate Change through Integrated Coastal Management」に関する国際会議が台湾で開催された。この会議を通して、沿岸域における気候変動と海面上昇の長期的な影響への対応策として ICM が強く打ち出され、その理念や各国の経験、課題等が検討され、その成果は ICM のガイドラインとしてまとめられた。この中で、海岸保全（海岸浸食対策や高潮対策）分野に係る ICM の原理については、以下に示すとおりであり、これらは国際社会において合意された最新の指針と言える。

- 沿岸域の資源システムは、移動性と相互依存性が高いため、従来の陸域を基準とした管理手法の適用は不適切である。
- 侵食や海面上昇の緩衝地としての役割を担い、長期の持続性に貢献する海岸地形(砂丘、海浜、マングローブ、珊瑚礁等)の保護、保全が必要である。そのためには、生態系に関する自然のプロセスを理解し、これらの地形と生態系の抵抗力を維持することが重要である。
- 自然の原理に則した設計を取り入れるべきである。
- 自然の漂砂移動の阻止は最小限にとどめるべきである。
- 早い段階での潜在的な競合の可能性を明らかにし、公共性を保護し増強する方策による公平な解決策を模索すべきである。総合的な沿岸域管理の全ての過程（計画、実施、モニタリング、評価）に対し、沿岸域に面した地域社会の参加が重要である。

前述したように、諸外国における最近の海岸保全対策の動向は、突堤、護岸、堤防などのハードな海岸構造物による対策から養浜対策へと移行しつつある。このような養浜対策への移行は、「海岸地形の保護」、「自然の原理に則した設計」、「自然の漂砂移動の阻止を最小限にとどめる」といった上記の ICM の原理に則したものになってきたことを示していると言える。

7.2.2 ツバルにおける海岸災害の発生分析とその対策

フォンガファレ島住民の直面している海岸災害の原因分析を、**図 7.6** に示す。これまでの調査結果から、フォンガファレ島において今後発生する可能性のある主たる海岸災害は、津波を除けば、ハリケーンなどの低気圧による海水面の上昇時の高波浪によるものである。現地調査やアンケート調査によれば、毎年定期的に生じる天文潮による島内各所の冠水による被害や、海岸侵食による被害はほとんど発生していない。

前述したように、フォンガファレ島住民の高波浪の脆弱性は次の原因によるものである。

1. 沿岸部への居住地域の拡大:太平洋戦争前はラグーン側の比較的高い地区に住んでいたが、現在は島中央部の飛行場周辺およびその外洋側の政府用地を除く島のほぼ全域に居住域が広がっていること
2. 太平洋戦争中の米軍によるラグーン側の海浜砂や砂丘、浅海の礫・サンゴの大量掘削に

よってラグーン側の波浪減勢機能が失われたこと、および軍用船舶用簡易埋め立て護岸の崩壊

3. 住民による外洋側の礫掘削によるストームリッジの破壊、植生の伐採等、外洋波の減勢機能を低下させている行為の常習化等

また、ツバルにおいて実施すべき海岸災害対策について、**図 7.6** の原因分析を基に問題解決型の分析（目的分析）を行ったところ、実施すべきソフトコンポーネントとしては、次のようなものが導かれる（**図 7.7** 参照）。

- ① 不法伐採対策と植栽計画の実施
- ② 礫材不法掘削対策の実施
- ③ 危険地域の住民対策の実施（危険マップ作成等）
- ④ 海岸災害の発生原因と安全対策についてのアウェアネス実施

これらのソフトコンポーネントは、海岸災害（越波災害）の低減につながるものとして非常に重要と考えられる。

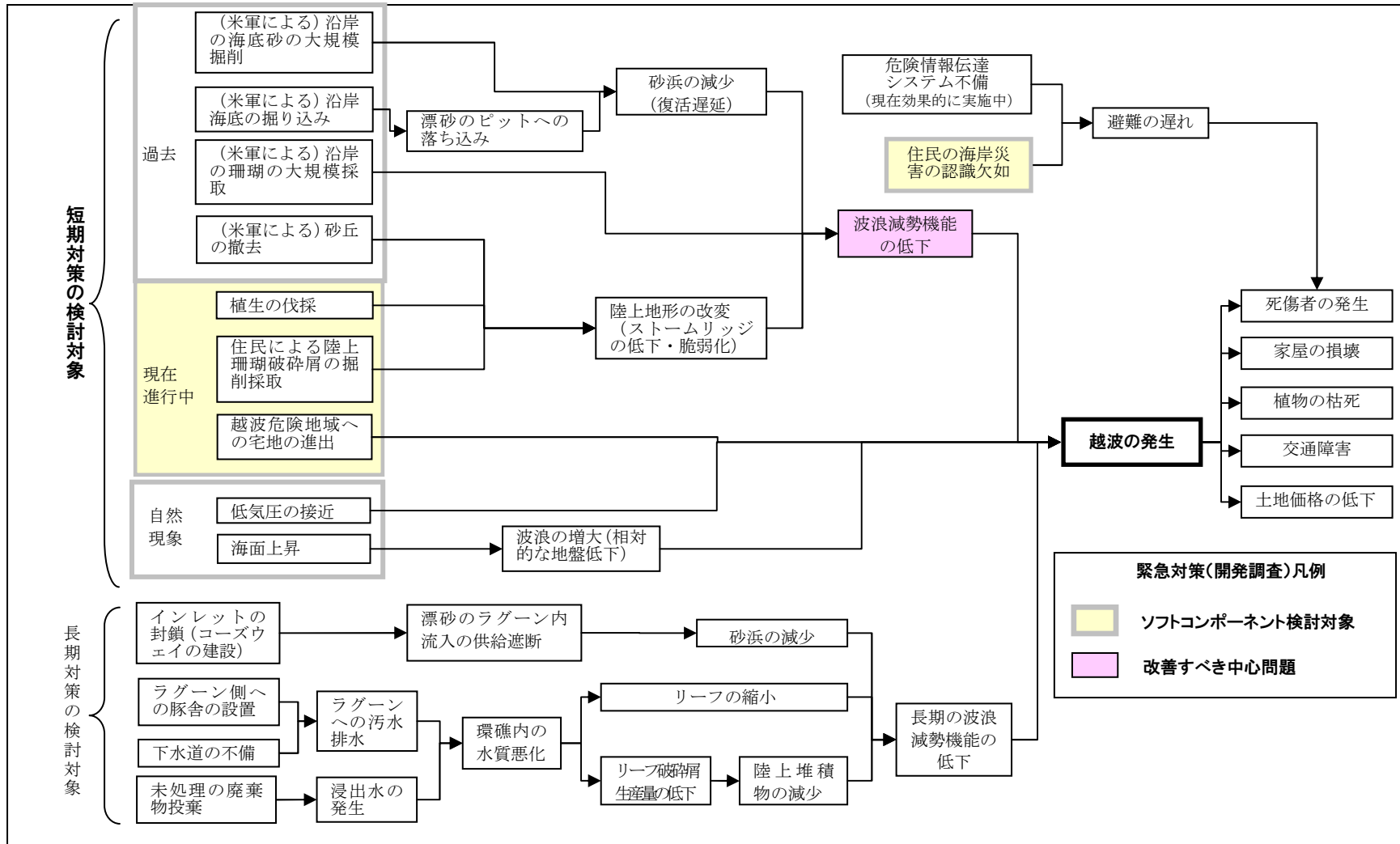


図 7.6 プロブレム・ツリー (越波の発生)

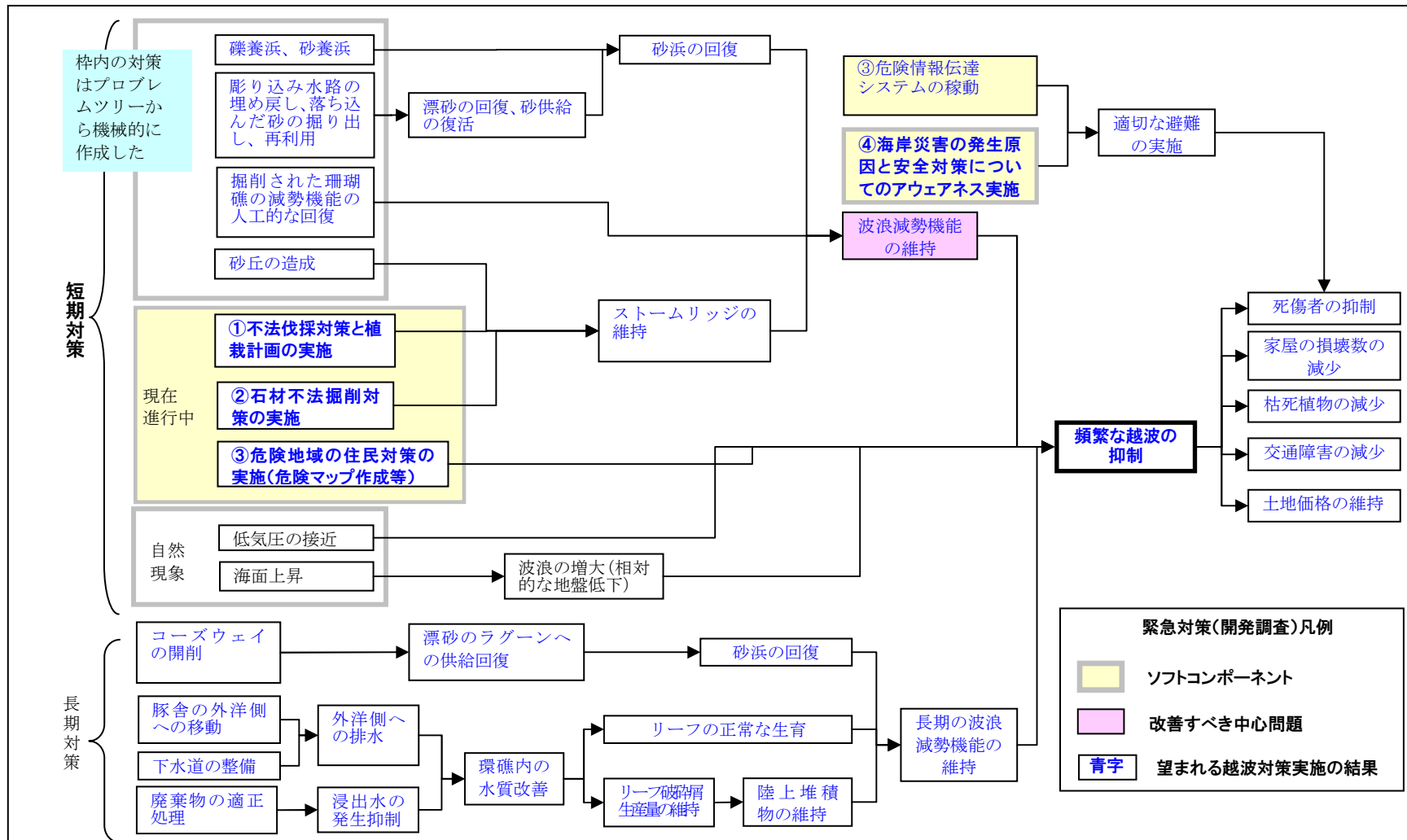


図 7.7 ソリューション・ツリー (越波災害低減対策)

7.2.3 ツバルにおける対策工法の選定についての考え方

(1) 対策工法の選定についての基本的考え方

対象地域における対策工法の選定にあたっては、これまでの検討結果を踏まえ、以下のような方針とする。

- 島が本来持っていた伝統的な海岸風景に合った工法とする。
- 海浜の再生を目指すべく、人為的な漂砂移動の阻止を最小限にとどめ、砂の堆積を促進できる工法とする。
- 地域住民の海岸利用状況、船舶の運航状況、及び地域の自然環境を考慮した工法とする。
- 海岸災害の軽減が最大限に図られるよう、ハード対策とともに地域住民が主体となるソフト対策を導入する。

(2) 対策工法の比較検討

現在、対象地域において海岸災害を引き起こすものは、越波に起因するものである。この越波対策については、基本的にハード対策として①離岸堤工法、②護岸工法、③養浜工法の三つが挙げられる。

表 7.3 には、ツバル国に適用が可能と考えられるこれらの工法の比較検討結果を示す。その結果、本プロジェクトでは、特に越波が多発するラグーン側海岸部については、緊急的・短期的な対策に対してその効果が期待でき、さらに JICA-JST 地球規模課題対応国際科学技術協力「海面上昇に対するツバル国の生態工学的維持」(以下、Foram Sand Project) が進める、長期的な対策(海浜の再生)にも繋がるものとして、粒径の粗い材料を用いる養浜工法を採用する。その採用理由としては、以下のとおりである。

写真 7.1 に見るように、Fongafale 島の中央部のラグーン側には数少ない砂浜が存在するが、砂浜の陸側端には勾配 1/4 から 1/6 の礫が堆積し、その沖には勾配 1/12 の砂が堆積するという複合断面となっている。岸側に堆積した礫は、高波作用時に陸側へと打ち上げられる特性(松浦ら、2009)があることから、護岸に似た役割を果たす。また、日本の茨城県の神向寺海岸における礫養浜によると、粒径 3-15mm の投入礫は護岸前面に 1/6 勾配で安定的に堆積するとともに、養浜完了後に砂が堆積することが報告されている(写真 7.2、7.3、7.4)。その場合の礫の堆積状況は、写真 7.1 に示すものと同一であった。このことは、検討対象区域でも礫(beach rock 片やサンゴの片)を用いた養浜(粗粒材養浜)が有効なことを示す。このような礫材は沖へ流出することがなく、また砂に比べて Tuvalu において入手が容易という利点がある。



写真 7.1 Fongafale 島の中心部のラグーン側海岸

(高潮部汀線は勾配 1/4 から 1/6 の礫浜、その海側に勾配 1/12 程度の細砂の砂浜)

一方、外海側の海岸は、ラグーン側に比べ海岸侵食防止用の構造物が非常に少なく、サンゴ礁起源の礫で構成されるストームリッジが外海からの波浪に対して極めて重要な役割を担っている。しかしながら、外海側の越波被害は、前述の 5.5 で述べたとおり、その背後の住民が、陸側の平坦面を広げるために、ストームリッジ近傍に生育している植生を伐採するとともに、ストームリッジを切り崩し、礫を建設資材として利用したことによるところが大きい。そのため、外海側の越波対策については、基本的にストームリッジが低くなっている箇所修復、その周辺での礫の採取や植生の伐採の規制といったソフト対策が中心となる。



写真 7.2 神向寺海岸施工前 (2002年9月8日)

出典；(財)土木研究センター提供



写真 7.3 神向寺海岸養浜完了2ヶ月後 (2008年6月5日)

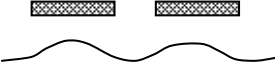

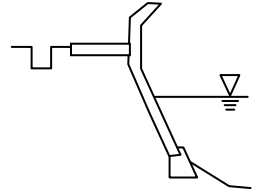

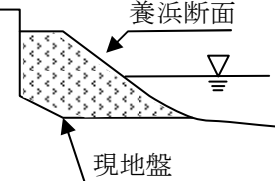

出典；(財)土木研究センター提供



写真 7.4 神向寺海岸養浜完了1年後 (2009年5月26日)

出典；(財)土木研究センター提供

表 7.3 海岸保全施設の比較結果

対策工法(模式図)	施工例(イメージ)	ツバル国における工法の適用		
		長 所	短 所	判 定
離岸堤(平面図) 		<ul style="list-style-type: none"> ・波浪低減による越波対策が期待 ・背後に静穏域がもたらされ、土砂が集積・維持可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺から土砂を集積するため、周辺海岸の侵食を引き起こしたり、ゴミの集積、水質悪化をもたらす場合がある ・海岸景観の阻害 	適用する場合、海岸全域を離岸堤で覆わなければならない非現実的 ×
護岸(断面図) 		<ul style="list-style-type: none"> ・越波に対し直接的な効果が期待 	<ul style="list-style-type: none"> ・反射波により底質の冲向き輸送が生じ、施設前面の洗掘、砂浜の消失の恐れ ・将来の土砂供給による砂浜の再生を阻害する恐れ ・陸から海への景観やアクセスを阻害 	Forum Sand Project による砂浜の再生を阻害 ×
養浜(断面図) 		<ul style="list-style-type: none"> ・周辺海岸への影響が少ない ・将来の土砂供給による砂浜の再生を阻害しない 	<ul style="list-style-type: none"> ・沿岸方向の土砂移動により計画断面を維持するため補助施設が必要 ・粒径が細かいと、沖へ流出しやすくなるため、維持養浜が必要 	粒径を粗くし、沖合への土砂損失を抑え Forum Sand Project による砂浜の再生を阻害しない最低限の補助施設とあわせて適用可能と判断 ○

7.3 海岸防護・再生事業の基本方針

7.3.1 事業目標

本プロジェクトで立案した海岸防護・再生事業は、海岸侵食等の防止に関する緊急的・短期的な対策事業であり、10年確率波相当の波浪により生じる越波災害を防止することを目的とした海浜整備事業である。目標年次は2020年としている。また、長期的な島の形成・維持メカニズムに悪影響を与える要因を緩和し、科学技術協力が進める長期的な対策（海浜の自然再生等）に繋がるものとして本事業を位置づけるものとする。

7.3.2 事業実施の基本方針

本事業による効果把握、計画の見直しなど、長期的視点に立った持続的な海岸管理体制を構築するために、図7.8に示すような順応的管理（PDCAサイクル）の観点から本事業を進めていくことを基本方針とする。

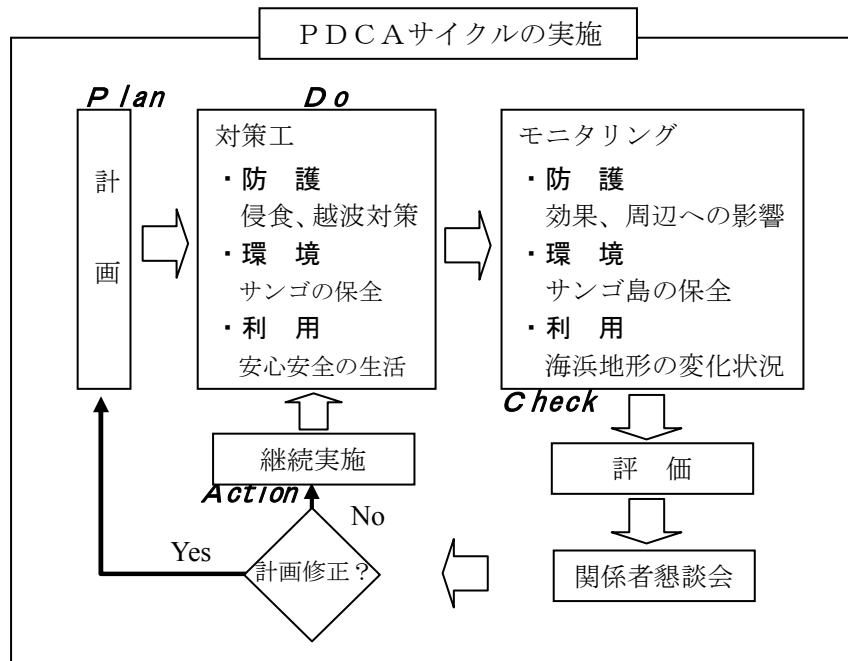


図 7.8 順応的管理（PDCAサイクル）による持続的な海岸防護・再生のイメージ

7.3.3 地域別の対策方針

地域別の対策方針については、表7.2に示す地域別の海岸災害の状況および緊急度を基に、考えられる対策案を表7.4に示すようにとりまとめた。

すなわち、緊急度1から3のレベルにある地域については、越波対策としてハード対策とソフト対策の両方を実施し、緊急度4以下のレベルにある地域についてはソフト対策のみを実施する。また、緊急度1および2の地域における対策案として示されている沿岸ボロービツ

ト埋め戻しは、以下のような効果を高めるものとして検討する。なお、沿岸ボロービットは、太平洋戦争中に米軍の基地および飛行場などの建設のための土砂を得るために、沿岸のリーフフラットを沖合にわたり掘削した跡地である。

1. 波浪エネルギーの低減（消波効果を高める）
2. 沿岸方向の砂の移動・堆積の促進（沿岸ボロービットの存在により、離岸流の発生等により砂が沖合へ流出したり、砂の沿岸方向の移動の障害になっている。砂の通り道を確認し、沿岸への砂の堆積を促進させる。）

外海側の越波対策については、ハード対策としてストームリッジが低くなっている箇所の修復（石積みによる嵩上げ）を計画するとともに、リーフエッジを形成する自然の仕組み（サンゴ礫の打上げと植生によるストームリッジの締め固め）を人為的に阻害しないように、ソフト対策による礫材不法採取・掘削対策、植生不法伐採対策および海岸災害の発生原因と対策に関する住民啓発活動などを中心に計画する。なお、ストームリッジの修復については、工法が比較的簡単であり、ツバル側（PWD、Kauple、住民）で十分対応出来るものである。

表 7.4 地域別の対策方針

検討地域		重要度	緊急度	考えられる対策案 上段:ハード対策 下段:ソフト対策
B地区	L-B地区 ラグーン側	家屋は少ないが、学校やゴミ処分場へ通じる道路があるため、優先度はやや高い。	3	ストームリッジ嵩上げ 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活
	O-B地区 外海側	家屋が少ないことから優先度は低い。	4	ハード対策なし 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活
C地区	L-C地区 ラグーン側	家屋が連続的に存在しFunafuti港とFongafale島中央部を結ぶ道路があることから優先度は高い。	2	ストームリッジ嵩上げや礫養浜 沿岸ボロービット埋め戻し 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活
	O-C地区 外海側	危険な箇所へ人が進出したり、ストームリッジを削って家屋の資材にして災害を招いていることは否めないが越波災害の危険度が高い。	3	ストームリッジ嵩上げ 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活
D地区	L-D地区 ラグーン側	基本方針に示されるように重要な公共施設があるため優先度は高い。	1	ストームリッジ嵩上げや礫養浜 沿岸ボロービット埋め戻し 植栽 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活
E地区	L-E地区 ラグーン側	家屋が少ないことから優先度は低い。	4	ハード対策なし 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活
	O-E地区 外海側	家屋が少ないことから優先度は低い。	4	ハード対策なし 礫材不法採取・掘削対策 植生不法伐採対策 海岸災害の発生原因と対策の啓発活

7.4 海岸保全施設の基本設計

7.4.1 対策施設の標準断面の検討

優先度が最も高い、政府機関や学校等の重要な公共施設のある Fonagafale 島中央部の L-D 地区および Fonagafale 島中央部と Funafuti 港を結ぶ道路があり、家屋が連続的に存在する 2 番目に優先順位の高い L-C 地区における礫養浜の標準断面について検討する。礫養浜の標準断面の検討フローを図 7.9 に示す。

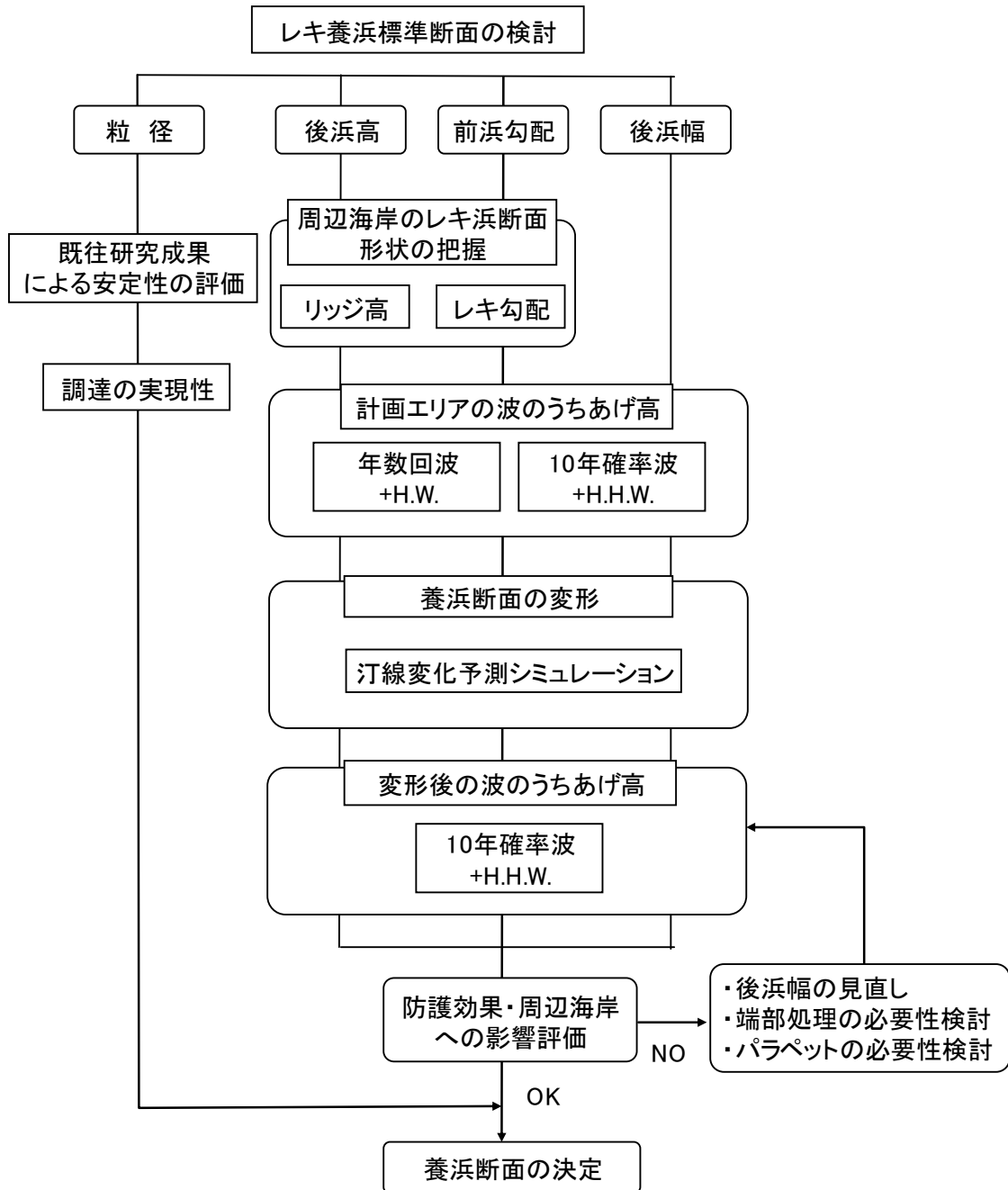


図 7.9 礫養浜の標準断面の検討フロー

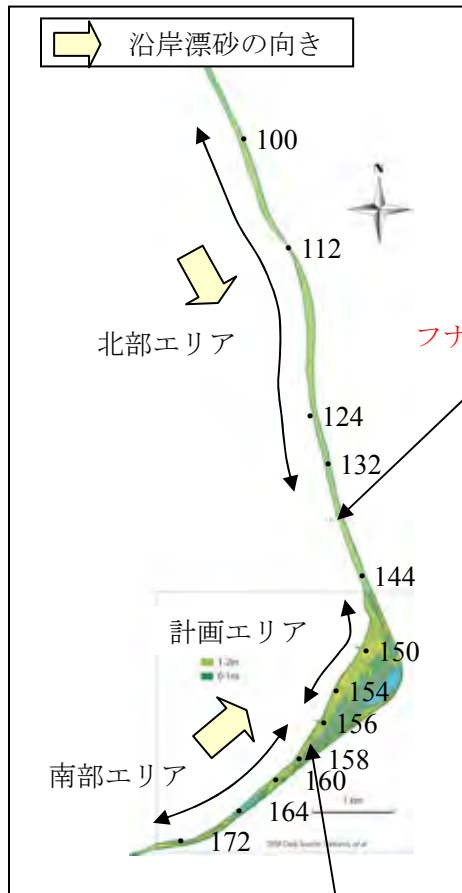


図 7.10 位置図



図 7.11 計画エリア

(1) 計画エリア周辺海岸の断面特性

計画エリアはフナフチ港や突堤により沿岸漂砂が遮断されているため、できるだけ自然に近い状態の海岸の断面特性を把握するため、計画エリア周辺の断面特性を整理した。

1) 北部エリア

リッジの高さ分布を図 7.12 に示すが、C. D. L. +3.9m~4.9m であり、平均すると 4.3m である。また、図 7.13 に示す礫の勾配は、北側で 1/3.5~1/4.5、南側で 1/3~1/4 程度と読み取ることができる。

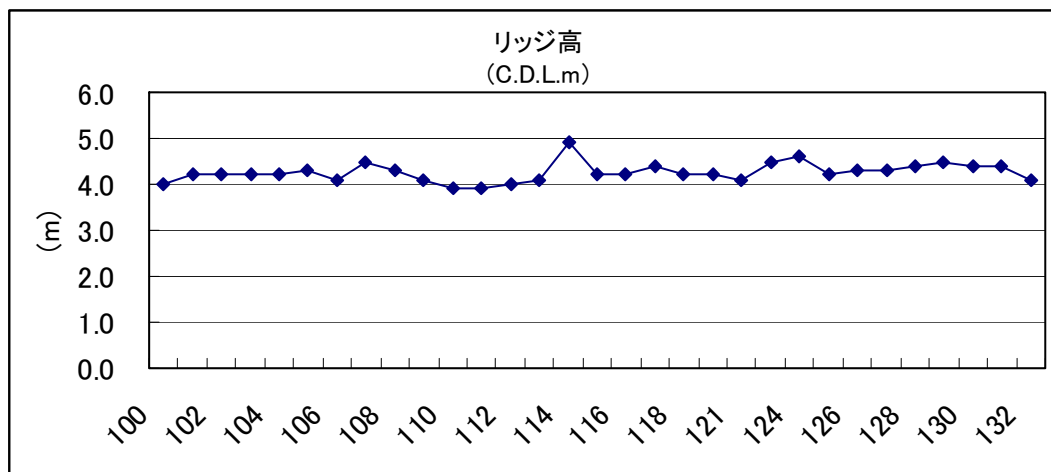
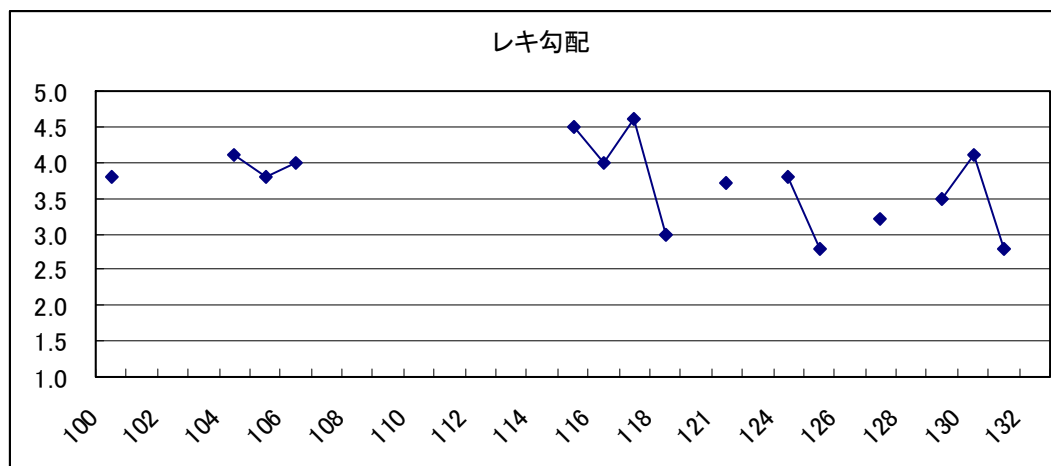


図 7.12 リッジの高さ分布



注) データのない測線は、レキがないため。

図 7.13 礫勾配の分布

2) 南部エリア

リッジの高さ分布を図 7.14 に示すが、C.D.L. +3.7m~4.7m であり、平均すると 4.1m である。また、図 7.15 に示す礫の勾配は、1/3~1/5 程度であることが分かる。

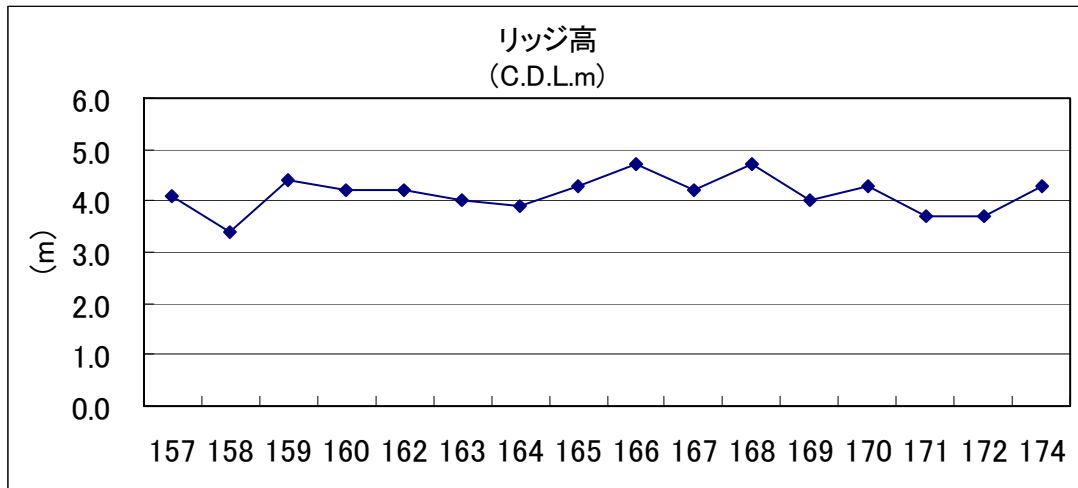


図 7.14 リッジの高さ分布

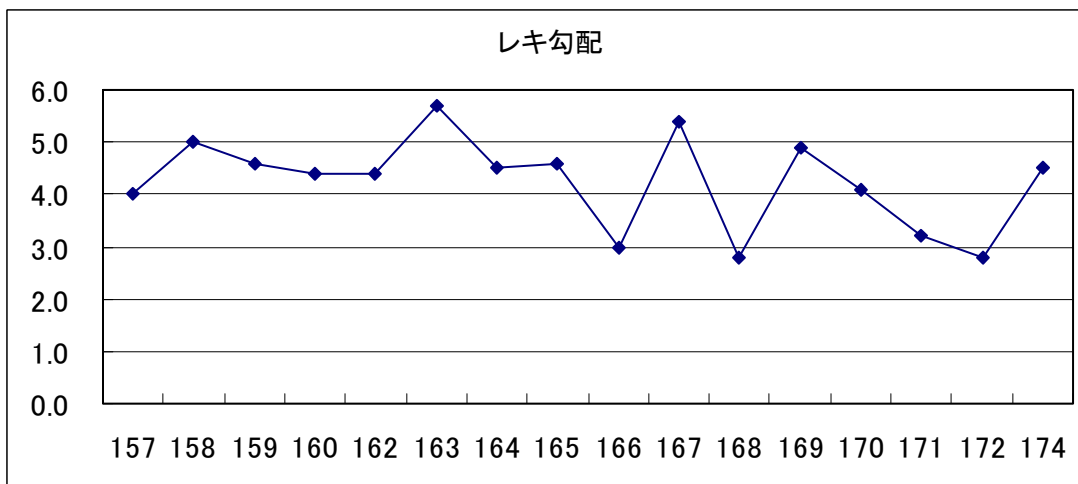


図 7.15 礫勾配の分布

(2) 計画エリアの波のうちあげ高

計画エリアのリッジ高、年数回波+H.W. 及び 10年確率波+H.H.W.L. による波のうちあげ高の分布を図 7.16 に示す。波のうちあげ高は中村の仮想改良勾配法によった。

これから、Area D-2 および Area D-3 の北側を除いて 10年確率波+H.H.W.L. による波のうちあげ高を満足していないことが分かる。

波のうちあげ高の外力条件

・年数回波浪

$$H_0' = 0.85\text{m}$$

$$T_0 = 4.1\text{s}$$

潮位 H. W. L. = 2.80m (C. D. L.)

・10年確率波浪

$$H_0' = 1.2\text{m}$$

$$T_0 = 4.2\text{s}$$

潮位 H. W. L. = 3.42m (C. D. L.)

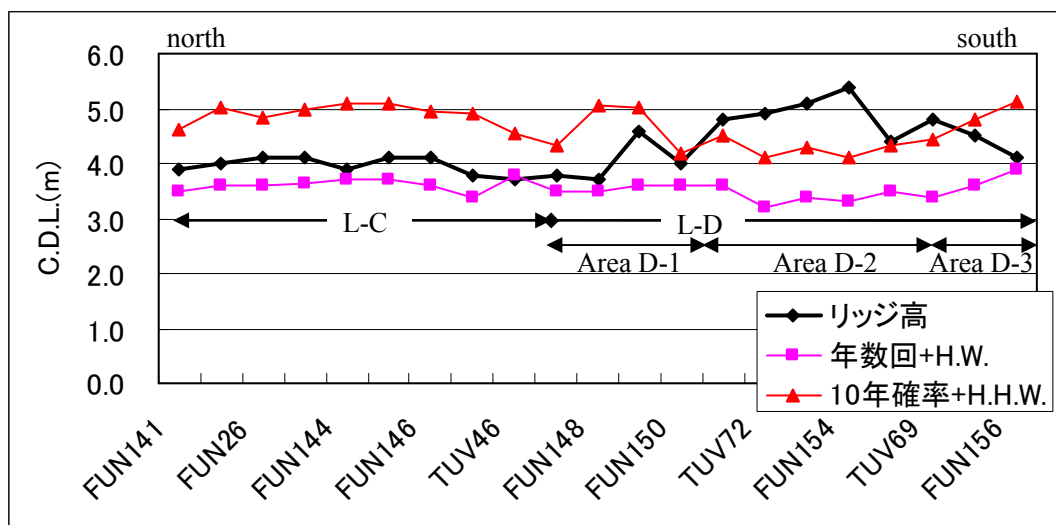


図 7.16 計画エリアの波のうちあげ高分布

(3) 養浜断面の検討

養浜の基本形状を図 7.17 に示す。前浜勾配は粒径によって変わるため、養浜材の検討とあわせて養浜断面を検討する。

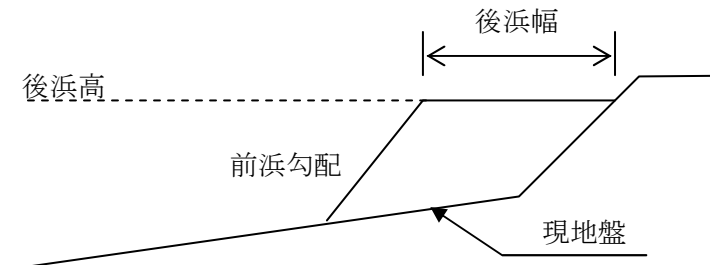


図 7.17 養浜の基本形状

1) 粒径

既往の研究成果で得られた指標、現地の現況海浜構成材料および入手可能な材料から決定する。

対象波浪は、養浜を施設と考え、沖への流出を施設の耐用年数の間生じさせないものとし、当該地域における以下の 50 年確率波浪とする。

○50 年確率波浪 ($H_o' = 2.2\text{m}$, $T_o = 5.6\text{sec}$)

砂の粒径の検討については、検討条件において海浜の安定条件の研究成果として各種基準などに示される 3 つの指標「a) バームと沿岸砂州の発生区分(武田・砂村)、b) 前浜の堆積・侵食の区分(宇多ほか)、c) 海浜の侵食・堆積の区分(堀川ほか)」により検討を行った(人工リーフの設計の手引き、1992、社団法人全国海岸協会)。

検討結果は、表 7.5 に示すとおりであり、安定する砂の粒径は、以下のとおりとなる。

○ $d_{50} = 6.5\text{mm}$ 以上

表 7.5 安定する砂の粒径 $d_{50}(\text{mm})$

	安定する砂の粒径 $d_{50}(\text{mm})$
a) バームと沿岸砂州の発生区分(武田・砂村)	2.3~6.5 以上
b) 前浜の堆積・侵食の区分(宇多ほか)	0.8~1.6 以上
c) 海浜の侵食・堆積の区分(堀川ほか)	3.7 以上

よって、現地での調達及び価格を考慮して、決定するものとする。

武田・砂村

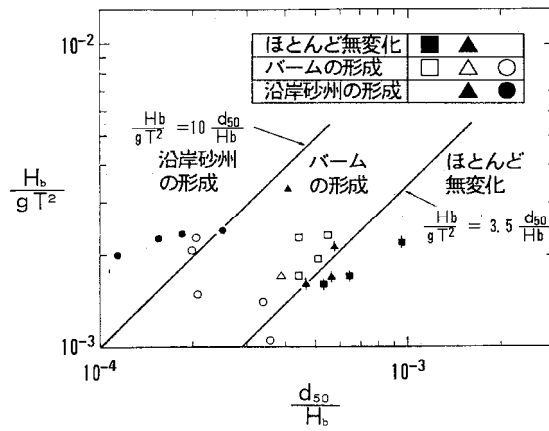


図 7.18 バームと沿岸砂州の発生区分

宇多ほか

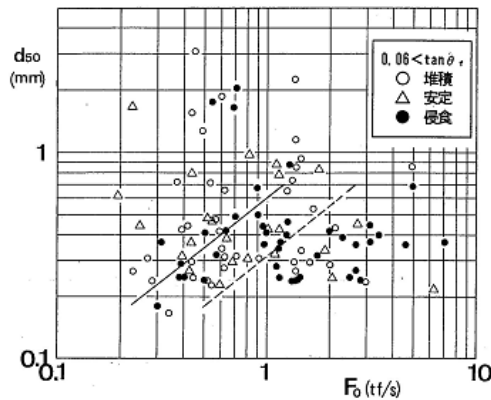


図 7.19 前浜の堆積・侵食の区分図 (0.06 ≤ tan θ)

堀川ほか

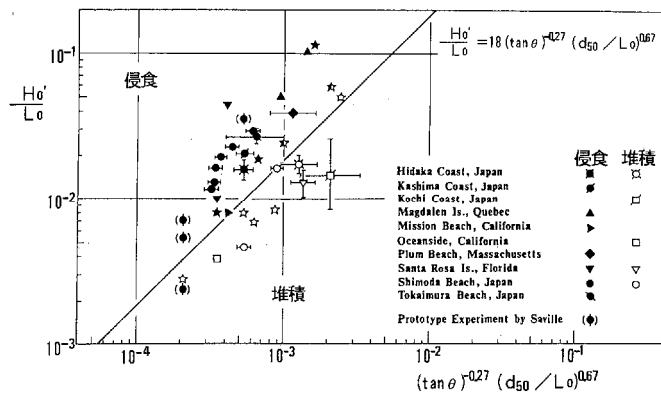


図 7.20 海浜の侵食・堆積の区分

a) 武田・砂村

合田の算定図より、砕波波高を求める。

$$Ho'/Lo=2.2/48.9=0.045$$

図 7.21 より、 $H_b/Ho'=1.20$

砕波波高： $H_b=2.2 \times 1.20=2.64(m)$

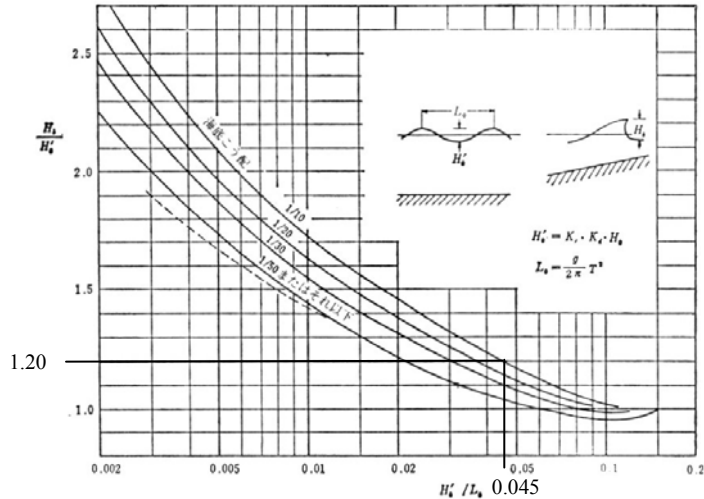


図 7.21 波形勾配と砕波波高の関係

図 7.18 より、バームの形成・ほとんど無変化となる条件は、

$$H_b/(gTo^2)=10d50/H_b$$

$$d50=H_b^2/(gTo^2)/10=2.64^2/(9.8 \times 5.6^2)/10=2.3 \times 10^{-3}(m)=2.3 (mm)$$

$$H_b/(gTo^2)=3.5d50/H_b$$

$$d50=H_b^2/(gTo^2)/3.5=2.64^2/(9.8 \times 5.6^2)/3.5=6.5 \times 10^{-3}(m)=6.5(mm)$$

よって、バームの形成、ほとんど無変化となる前浜の中央粒径は $d50=2.3 \sim 6.5(mm)$

b) 宇多ほか

入射波のエネルギーフラックス Fo を算出する。

$$Fo=1/8\rho_w (Ho')^2Cgo$$

ここに、 Cgo ：沖波の群速度($=gT/(4\pi)$)

$$Cgo=9.8 \times 5.6/(4 \times \pi)=4.37(m/s)$$

$$Fo=1/8 \times 1.03 \times 2.2^2 \times 4.37=2.72(tf/m)$$

前浜勾配は $\tan \theta f=1/4=0.25$ であることから、図 7.19 より、安定・堆積となる条件は、

$$d50=0.31Fo=0.31 \times 2.72=0.8$$

$$d50=0.60Fo=0.60 \times 2.72=1.6$$

よって、安定・堆積となる前浜の中央粒径は $d50=0.8 \sim 1.6(mm)$

c) 堀川ほか

図 7.20 より、堆積となる条件は、

$$Ho/Lo=18(\tan \theta)^{-0.27}(d50/Lo)^{0.67}$$

$$d50 = (H_o/L_o/18/(\tan \theta)^{-0.27})^{(1/0.67)} L_o$$

$$= (2.2/48.9/18/(1/4)^{-0.27})^{(1/0.67)} \times 48.9 = 2.7 \times 10^{-3} (\text{m}) = 3.7 (\text{mm})$$

よって、堆積となる前浜の中央粒径は $d50=3.7(\text{mm})$

3)前浜勾配

現地の礫の勾配は、計画エリアの北側で 1/3.0～1/4.5、南側で 1/3～1/5 程度となっているため、1/4 とした。

4)後浜高および後浜幅

後浜高および後浜幅は、現況及び現地の自然条件に合った礫浜を計画するため、次の点を考慮して決定した。

- ・自然に近い周辺海岸のリッジ高(北側平均 4.1m、南側平均 4.3m)を考慮
- ・年数回程度来襲する波浪と H.W.による波のうちあげ高を満足する後浜幅と後浜高
- ・10年確率波浪と H.H.W.による波のうちあげ高がリッジ高(後浜高がリッジ高より高い場合は後浜高)を満足できる浜幅

表 7.6 に計画エリアのリッジ高と参考のため現況断面における波のうちあげ高を示す。これらから、礫養浜による必要な後浜高および後浜幅は表 7.7 のとおりとなり、標準断面は、図 7.22 に示すとおりとなる。なお、図 7.23～図 7.30 に各断面の状況を断面図と写真を用いて整理した。

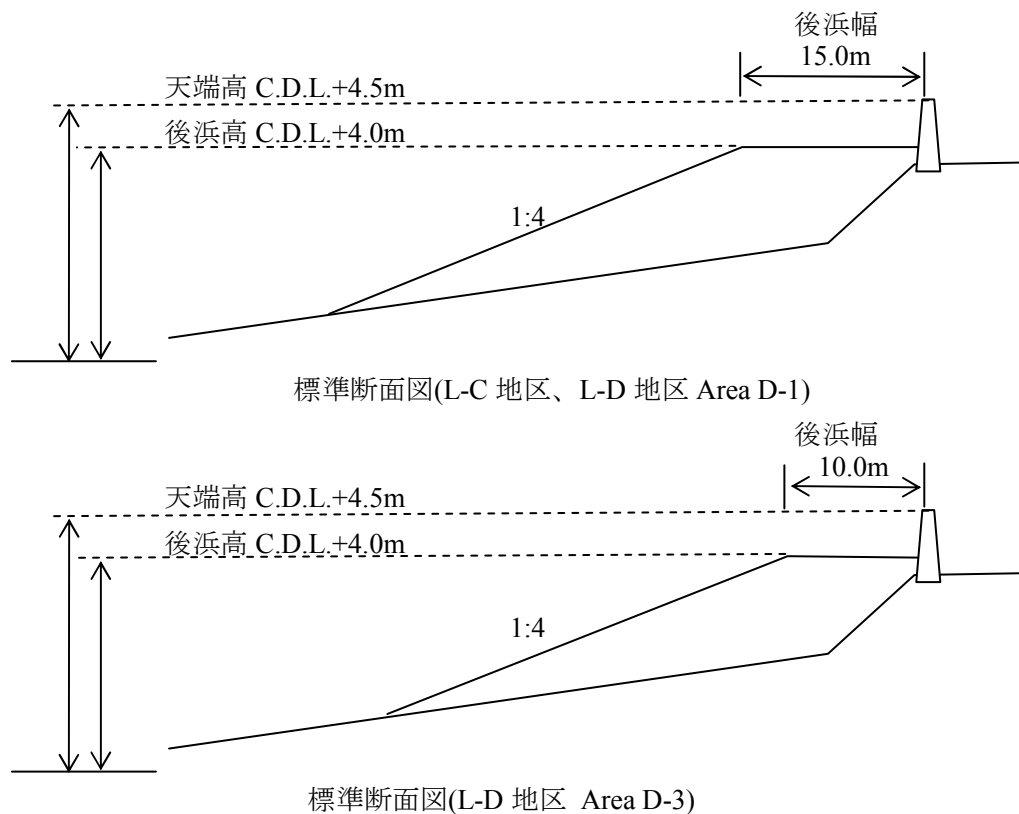


図 7.22 礫養浜の標準断面

表 7.6 後浜高および後浜幅の設定

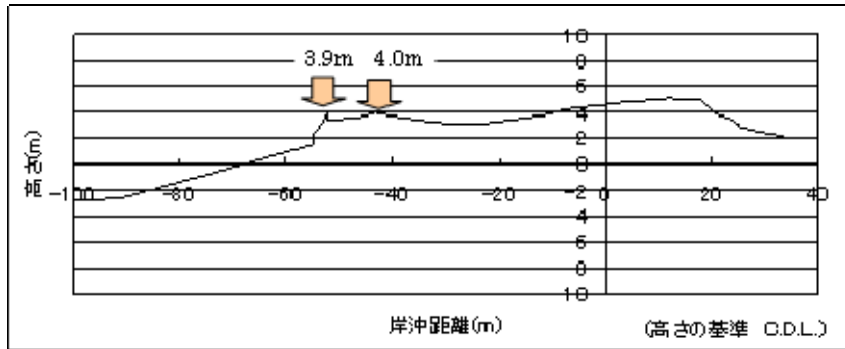
Area	Line	リッジ 高 (C.D.L. m)	後浜高 (C.D.L. .m)	波のうちあげ高 10年確率波+H.H.W.L. (C.D.L.m)			波のうち あげ高 年数回波 +H.W.L (C.D.L.m)
				後浜幅(m)			後浜幅(m)
				現況	10	15	現況
L-C	Fun141	4.0	4.0	4.6	4.1	4.0	3.5
	Fun142	4.0		5.0	4.2	4.0	3.6
	Fun26	4.1		4.8	4.2	4.0	3.6
	Fun27	4.1		5.0	4.2	4.0	3.6
	Fun144	3.9		5.1	4.1	4.0	3.7
	Fun145	4.1		5.1	4.1	4.0	3.7
	Fun146	4.1		5.0	4.2	4.0	3.6
	Fun147	3.8		4.9	4.1	4.0	3.4
L-D	D-1	Tuv46	4.0	4.6	4.1	4.0	3.8
		Fun30		4.3	4.2	4.0	3.5
		Fun148		5.1	4.1	4.0	3.5
		Fun149		5.0	4.4	4.0	3.6
		Fun150		4.2	4.0	—	3.6
	D-3	Tuv69	4.0	4.5	4.1	—	3.4
		Fun155		4.8	4.1	—	3.6
		Fun156		5.1	4.2	4.0	3.9

注)赤字はうちあげ高を満足しない浜幅のうちあげ高、青字は満足する場合のうちあげ高

表 7.7 礫養浜の必要後浜高および後浜幅

地 区	後浜高(C.D.L.)	後浜幅	
L-C	+4.0m	15m	
L-D	D-1	+4.0m	
	D-2	現況のうちあげ高を満足するため、対策は行わない。	
	D-3	+4.0m	0m~15m

Fun141



Fun142

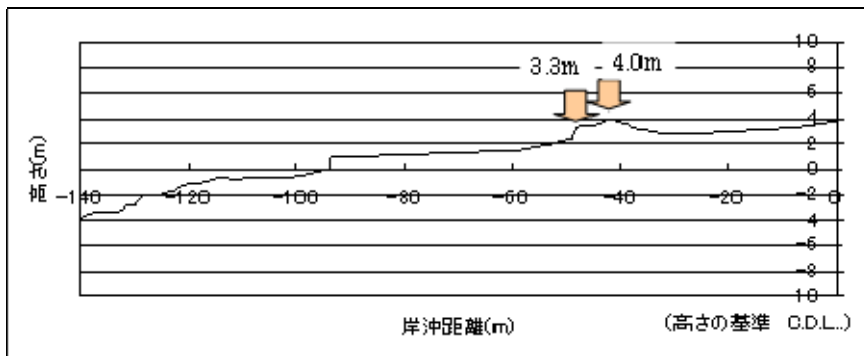
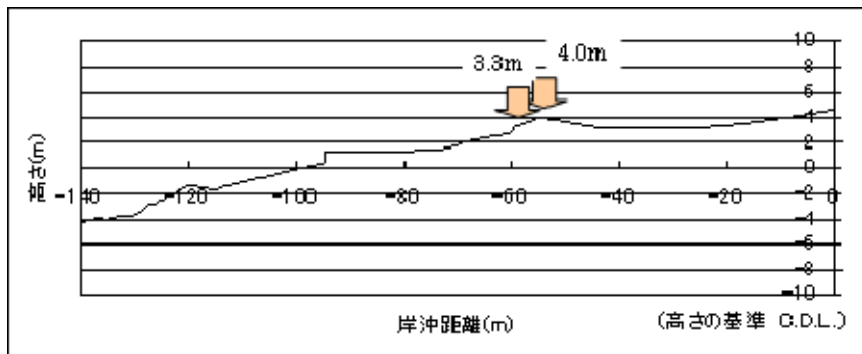


図 7.23 測線の状況

Fun26



Fun27

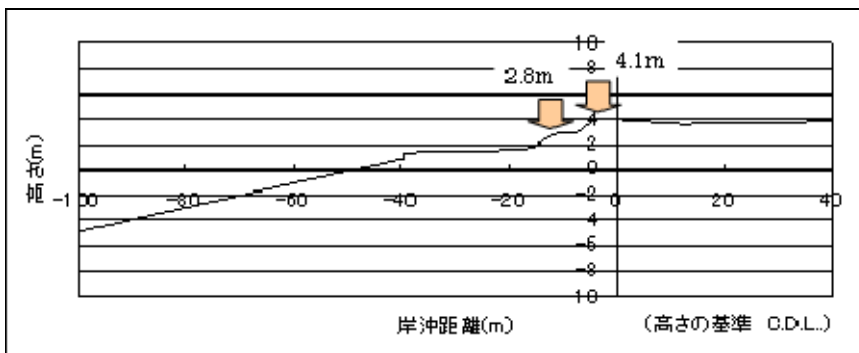
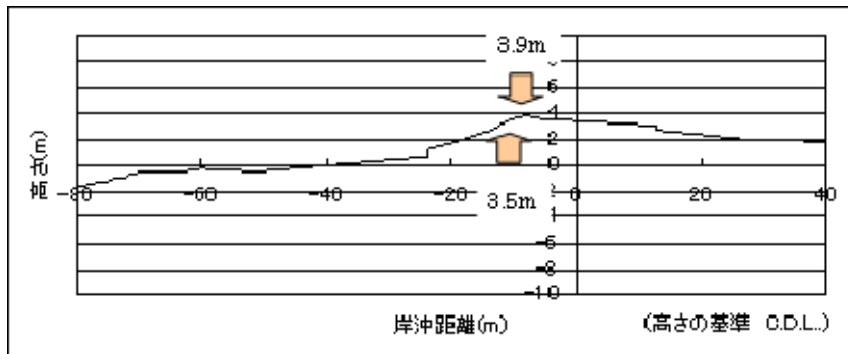


図 7.24 測線の状況

Fun144



Fun145

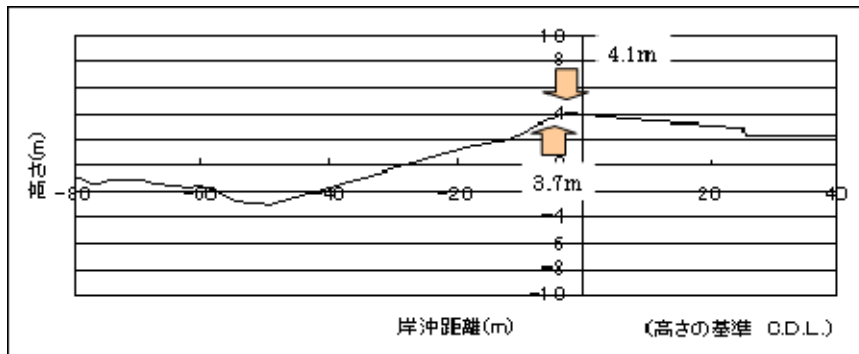
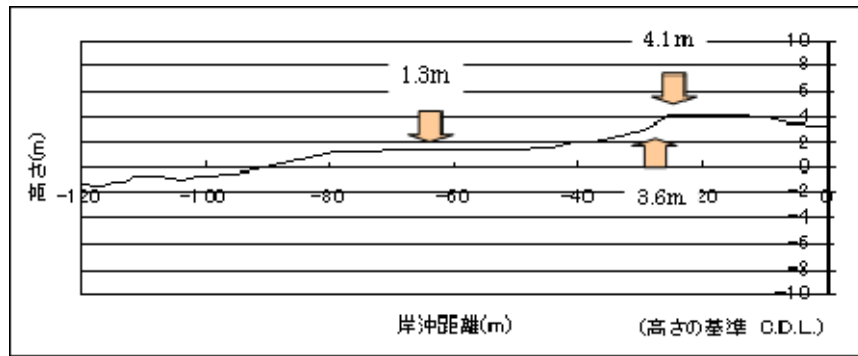


図 7.25 測線の状況

Fun146



Fun147

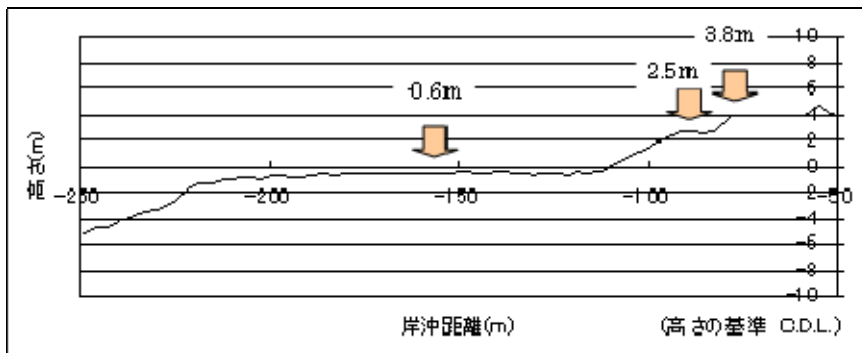
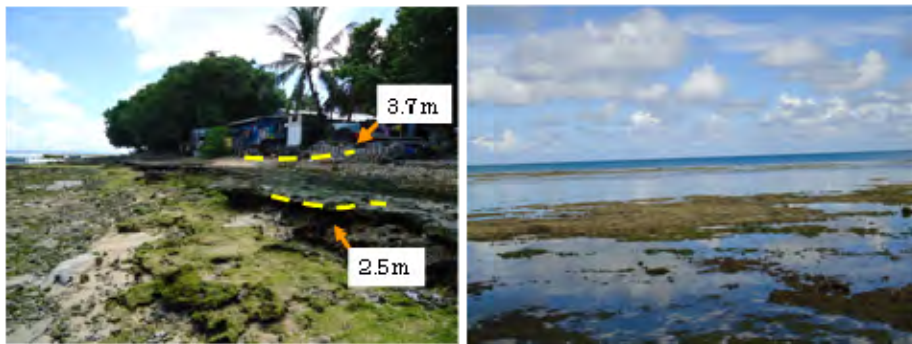
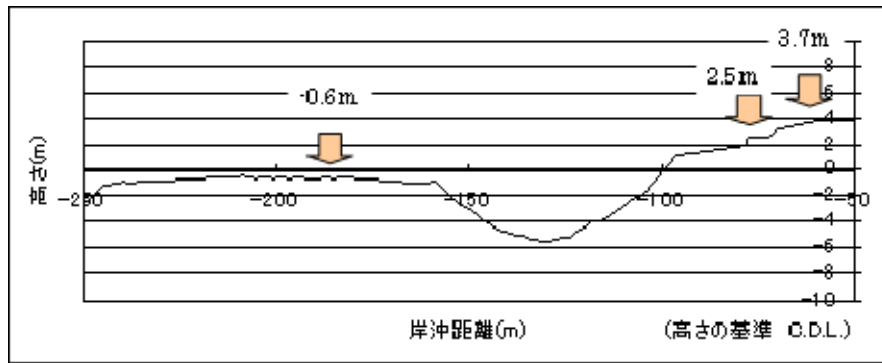


図 7.26 測線の状況

Tuv46



Fun30

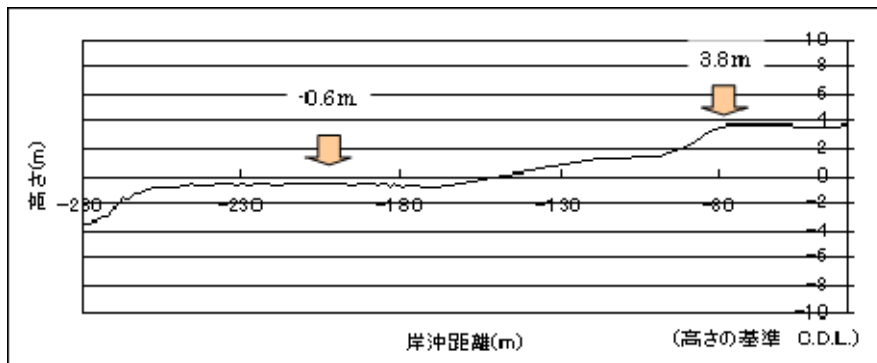
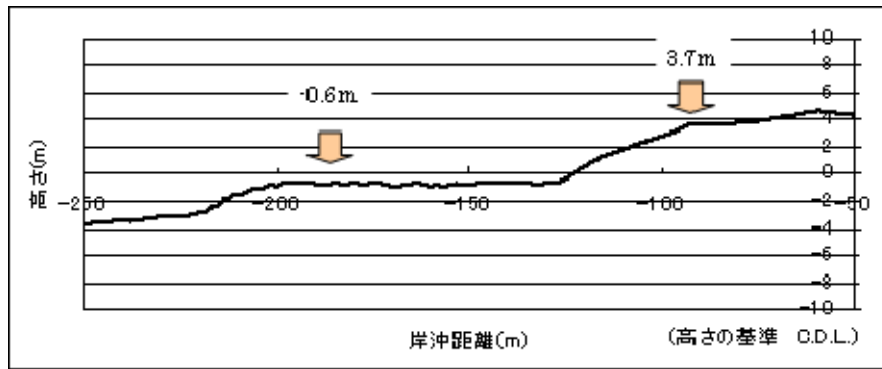


図 7.27 測線の状況

Fun148



Fun149

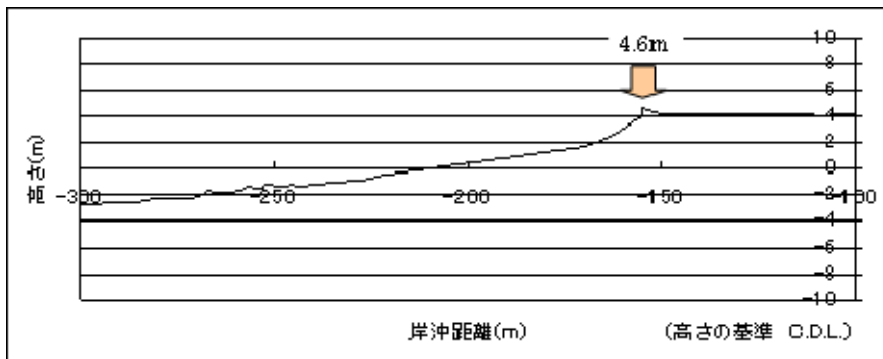
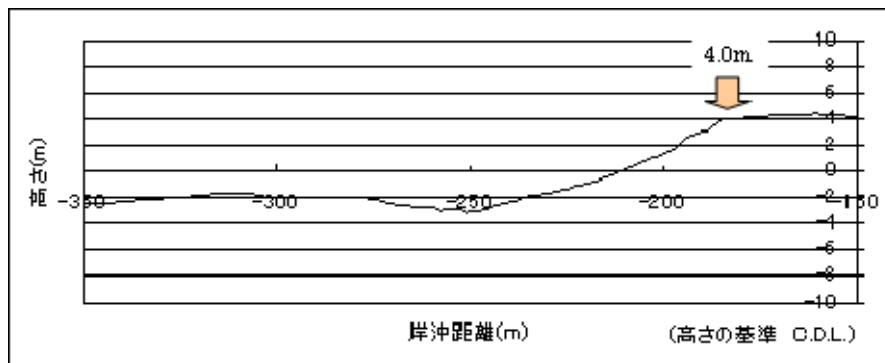


図 7.28 測線の状況

Fun150



TUV69

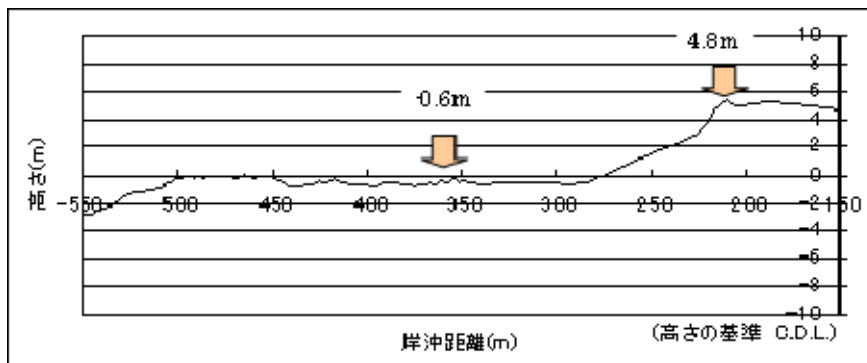
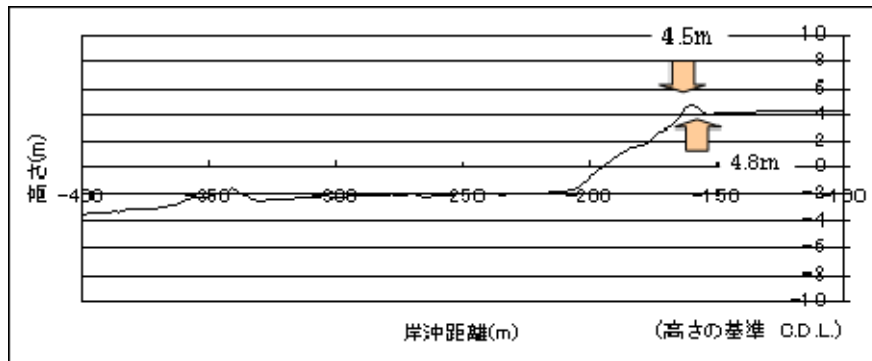


図 7.29 測線の状況

Fun155



Fun156

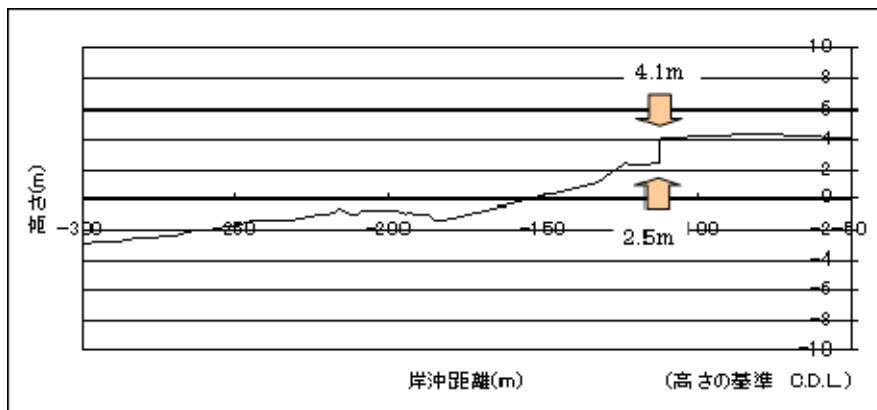


図 7.30 測線の状況