

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 948 Dec. 1999

島状ヘッドランドによる人工海浜の安定化に関する模型実験

平	山	克	也
丸	山	晴	広
平	石	哲	也

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
1. 1 従来の研究 .....	4
1. 2 実験の目的と手法 .....	5
2. 既往調査 .....	5
2. 1 人工海浜の位置 .....	5
2. 2 人工海浜の標準断面 .....	5
2. 3 養浜砂の選定 .....	6
2. 4 入射波条件 .....	6
2. 5 既往調査における海浜変形数値解析結果 .....	9
3. 実験方法 .....	12
3. 1 実験条件の設定方法 .....	12
3. 2 二次元移動床実験 .....	14
3. 3 予備実験 .....	16
3. 4 再現実験 .....	22
3. 5 模型時間縮尺の検討 .....	25
4. 海浜安定工法に関する実験結果 .....	26
4. 1 島状ヘッドランド案の選定 .....	26
4. 2 島状ヘッドランド案における海浜安定実験 .....	30
4. 3 海浜前面掘削案における海浜安定実験 .....	33
4. 4 人工海浜の安定性評価 .....	36
4. 5 離岸堤背後の航路埋没に関する危険性評価 .....	38
4. 6 最適工法の提案 .....	38
5. 結論 .....	39
謝辞 .....	41
参考文献 .....	41
記号表 .....	42
付録 .....	43

# The Model Experiment on Artificial Beach Stabilization by Island-type Headland

Katsuya HIRAYAMA\*  
Haruhiro MARUYAMA\*  
Tetsuya HIRAISHI\*\*

## Synopsis

The model test on the stability of sediments for the artificial beach constructed in the *toribar* district in the Hirara port is carried out in the three-dimensional hydraulic model basin.

The purpose of the paper is as follows; i) The establishment of the new experimental technique in the movable-bed model for study the stability of artificial beaches surrounded by coral reefs, where its wave and current become complicated. ii) The investigation for the applicability of the island-type headland to the stability of the artificial beach.

In the formation process of the artificial beach constituted by the headlands, it is necessary to use the undistorted model in order to reproduce deformation process of wave such as refraction, diffraction and wave breaking on the complicated reef topography. The distortion level of experimental waves should be determined by the several trials in the movable-bed model experiment, because the froude rule is not applied to the model test using sands. Some field observation data is necessary to get its distortion level and to verify the applicability of distorted model. However, the appropriate field observation data does not exist. So, the numerical analysis on original plan and 150m jetty plan, whose effects were expected for beach stabilization in the 1993 computation, have been set as a reproduction targets on flow field around the artificial beach, topographic evolution and shoreline change.

The construction of 150m jetty plan is difficult by the constraint of surroundings and environmental problem. Therefore the island-type headland plan is proposed as the alternative beach protection method.

The result of beach stability model test on the island-type headland with four detached breakwaters have shown the equivalent effect completed by 150m jetty plan, the island-type headland do not induce its large-scale erosion and shoreline regression observed in the original plan. From the experimental results, the optimum configuration of headland is proposed.

**Keyword:** Coral reef, Artificial beach, Movable bed, Experiment, Headland, Beach stabilization

---

\* Member of Wave Laboratory , Hydraulic Engineering Division  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Tel : 0468-44-5010, Fax : 0468-41-3888, E-mail : hirayama@cc.phri.go.jp

\*\* Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

# 島状ヘッドランドによる人工海浜の安定化に関する模型実験

平山克也\*  
丸山晴広\*  
平石哲也\*\*

## 要旨

本実験では、平良港トゥリバー地区に計画されている人工海浜を対象として、移動床平面模型実験により人工海浜の安定性を検討する。本資料では、複雑な波・流れ場を形成する珊瑚礁海域において、現地観測データが得られない人工海浜に対する移動床模型実験の手法を示し、かつ、島状ヘッドランドを面的に配置する方法を景観に配慮した海浜安定化工法として位置づけ、その効果を検証することを目的とする。島状ヘッドランドによって構成される当該人工海浜の海浜形成過程においては、波の屈折や回折、碎波など、複雑なリーフ地形による波浪の変形過程が重要となるので、歪み模型を用いることはできない。また移動床実験においては、砂移動に関してフルードの相似則が適用できないので、実験波は、現地の漂砂移動を再現するように試行錯誤により決定される。しかしながら、当該人工海浜は建設途上であるため、本実験で再現目標とする現地観測データは存在しない。そこで本実験では、基本計画案、および海浜の安定化に効果の期待される150m突堤案を対象として平成5年度に実施された、人工海浜周辺の流れ場、地形・汀線変化に関する数値計算結果を再現事象として設定した。本実験では、現実には周辺環境などの制約により施工が困難な150m突堤案に代えて、島状ヘッドランドを面的に配置する方法を提案し、海浜の安定に必要な施設配置条件を検討した。4基のヘッドランドからなる島状ヘッドランド案について海浜安定実験を実施した結果、基本計画案でみられたような海浜北側の大規模な侵食や汀線後退を生じず、150m突堤案と同程度の海浜安定化効果を期待できることが判明した。一方、平成9年度には、南側海浜建設予定地内の既存船着き場の機能を維持するために海浜形状の計画変更が行われ、同時に航路を確保することが必要となった。そこで移動床模型実験において随時航路周辺の流速分布および漂砂移動を観察し、養浜砂による航路埋没の危険性がないことを確認した。

キーワード：珊瑚礁，人工海浜，移動床，模型実験，ヘッドランド，海浜安定化工法

---

\* 水工部波浪研究室  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1  
Tel : 0468-44-5010, Fax : 0468-41-3888, E-mail : hirayama@cc.phri.go.jp

\*\* 水工部波浪研究室長

## 1. はじめに

近年の港湾計画においては、海浜が有するさまざまな機能、例えば、優れた消波機能、親水性、景観の良さ、などが広く認識されるようになり、港湾施設の一つとして、港湾区域内に人工海浜を造成する事例が多数みられるようになってきている。そのような中、とくに、珊瑚が群生するような自然に恵まれた海域では、人や自然にやさしい港湾整備が不可欠となっており、人工海浜を有効に活用することが求められている。

しかしながら、このような海域では、珊瑚礁が作り出す変化に富んだ地形のために、さまざまな波浪変形が生じ、一般に、周辺の波浪場は非常に複雑なものとなっている。したがって、そのような場所に建設される人工海浜の安定性を検討する際には、水理模型実験や数値解析を行うことが必要である。

本資料では、複雑な波・流れ場を形成する珊瑚礁海域において、現地観測データが得られない人工海浜に対する移動床模型実験の手法を示し、かつ島状ヘッドランドを面的に配置する方法を景観に配慮した海浜安定化工法として位置づけ、その効果を検証することを目的としている。

ここで、島状ヘッドランドとは、ヘッドランドとして海浜変形の基点となる機能を有するとともに、大規模な幅を有する離岸堤として、背後にトンボロ状の堆積を促すものとして定義する。そして、海浜を形づくる養浜砂や人工岬（ヘッドランド）とともに人工海浜を形成する構造物となり、沿岸漂砂の発生を抑制し、安定な人工海浜を創出するために必要に応じて施工を検討するものである。

### 1. 1 従来の研究

近年の海洋レクリエーション需要の増加に伴い、わが国においても 1970 年頃から人工海浜の建設が立てられるようになった。また、珊瑚礁が発達した海域に本格的な人工海浜が建設されたのもこの時期である。

沖縄国際海洋博覧会会場に建設された“エキスポ・ビーチ”では、それまでの試験的施工事例を参考としながら現地施工し、適宜追跡調査を実施して、最終的な養浜断面を決定するという試行錯誤的な方法により施工された（藪下ら、1976）。しかし、ここではすでに、曲線を基調とした人工岬（ヘッドランド）などの構造物を設置したり、利用者の視界に入る人工構造物は可能な限り自然石で施工し、ヤシなどの高木やその他の低木を植栽するなど、周辺環境や景観に配慮しつつ安定な海浜を創出

する工夫がなされている。

現在、人工海浜の安定性を検討する方法には、海浜変形モデルを用いた数値計算による方法と、二次元あるいは三次元の移動床模型を用いた水理実験による方法がある（運輸省港湾局、1992）。

数値計算による方法では、海浜変形モデルの精度とともに、モデルに含まれる各種パラメータをいかに設定するかということが大きな課題である。そこで、すでに現地観測データの存在する海浜における海浜変形の再現計算を実施したり、計算対象とした海浜の変形に関する追跡調査を実施するなどして、モデルのキャリブレーションを実施し、数値計算の精度を検証する必要がある。

一方、移動床模型を用いた水理実験を行う方法では、砂移動に関してフルードの相似則が適用できないことから、対象模型ごとに漂砂移動に関する相似性を満足する何らかの歪みを決定しなければならない。この歪みの対象には、波浪条件、模型砂の比重、粒径、あるいは模型の鉛直歪みなどが挙げられる。

移動床実験に関するこうした歪みを決定する際には、通常、現地観測データに基づく再現実験が実施される。しかしながら人工海浜では、計画段階あるいは建設途上においては現地観測データが得られず、直接海浜変形の再現事象となるデータが存在しないため、移動床模型実験を行う際にはさまざまな工夫が必要となる。

柳嶋ら（1990）は、珊瑚礁海岸に造成される人工海浜の水理実験において、豊浦標準砂を用いた水平縮尺 1/60、鉛直縮尺 1/46.15 の幾何学的な歪みを有する移動床模型を用いて、最適な施設配置の検討を行っている。ここで実験波浪は、対象区域にすでに設置されている護岸からの越波の状況や堆積砂の状況などを再現事象とし、トレーサーの移動状況に着目した現況再現実験により確認している。

また、木本ら（1995）は、人工リーフと 4 つの突堤によって構成される 2 組の人工海浜における安定性の検討に関して、縮尺 1/40 の歪みなし二次元模型を用いた人工リーフによる海浜断面の変化の検討、および縮尺 1/50 の歪みなし三次元模型を用いた突堤と人工リーフによる海浜形成の検討を行っている。ここでは、海浜変形の再現事象が得られない場合の移動床実験手法を確立するために、現地データと実験データがともに考慮され、かつ両者の縮尺効果が考慮された Dean（1991）および土屋・伊藤（1981）の研究に着目して、海浜変形の相似則が提案されている。ただし、この相似則が適用された対象海浜では、養浜砂の粒径が 2.5mm と大きく、漂砂移動および底質同士の摩擦関係を相似する模型砂の粒径も

0.5mm と大きい。

### 1. 2 実験の目的と手法

本実験は、平良港トゥリバー地区に計画されている人工海浜を対象として、移動床水理模型実験により人工海浜の安定性を検討し、最適な施設配置の選定を行うものである。

本実験では、他の人工海浜同様、海浜変形に関する相似則を決定する現地観測データが得られない。しかしながら、当該人工海浜では既往調査（沖縄総合事務局平良港工事事務所、1993）において、数値計算による海浜変形予測が得られている。そこで、本実験では、この計算結果を再現事象として採用し、複雑な波浪場を再現するために歪みなし移動床模型を用い、海浜変形の相似性は波浪条件を歪ませることにより満足することとした。

## 2. 既往調査

本実験で対象とした平良港トゥリバー地区人工海浜では、既往調査（沖縄総合事務局平良港工事事務所、1993）において、現地の自然条件や人工海浜の計画形状、および数値モデルによる汀線、地形変化予測結果などが得られている。そこで、まずこの内容について概説する。

### 2. 1 人工海浜の位置

当該人工海浜は沖縄県宮古島北西に位置する平良港湾区域内に建設されている。当該人工海浜の設置位置およびその完成イメージ図を図-2. 1に示す。人工海浜周辺には珊瑚が群生し、恵まれた自然を有している反面、周辺の海域では複雑な波・流れ場が形成されていることが予測される。

### 2. 2 人工海浜の標準断面

標準断面は、利用者の利便性、快適性、および海浜断面の安定性を考慮して、図-2. 2のように設定された。標準断面における主な諸元は以下のものである。

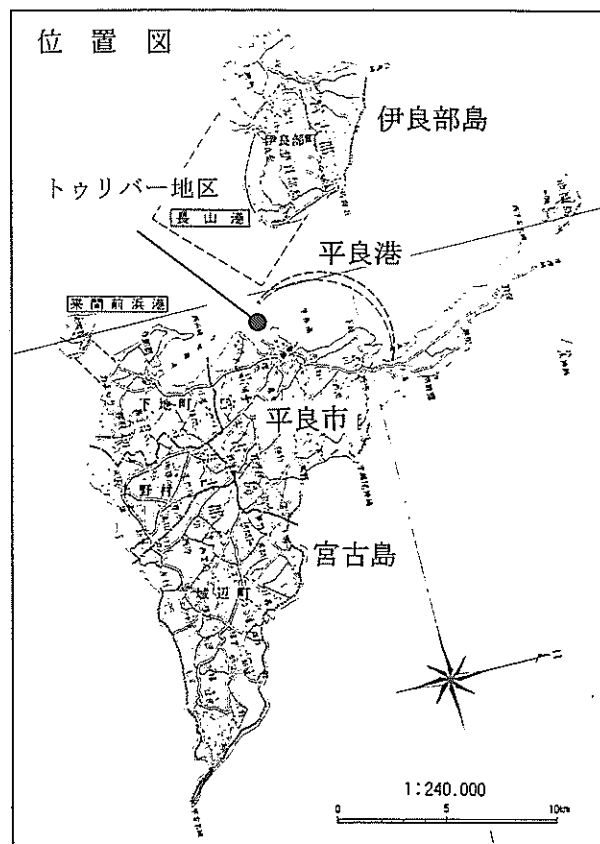


図-2. 1 当該人工海浜の位置

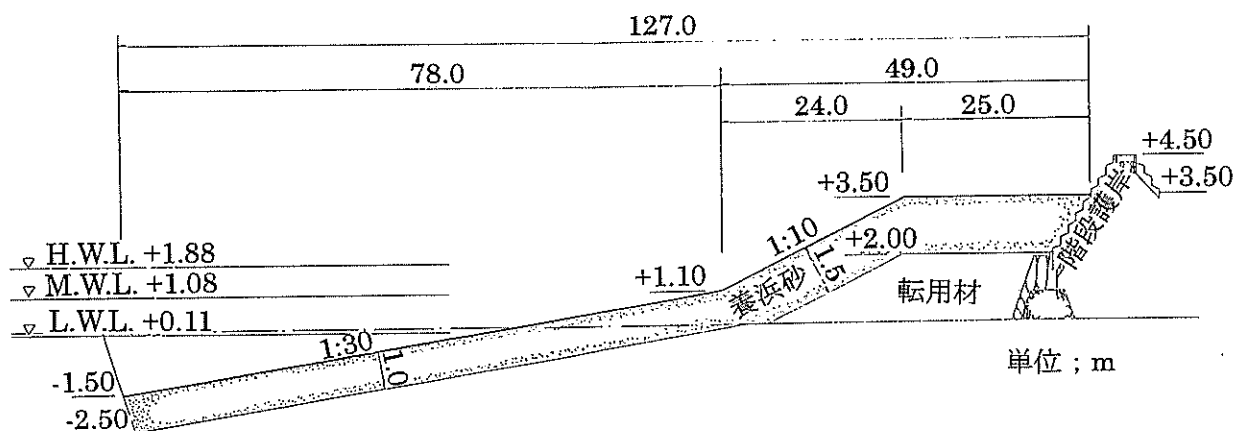


図-2. 2 当該人工海浜の標準断面

前浜勾配：1/10

外浜勾配：1/30

前浜勾配と外浜勾配の変化点：D.L.+1.10m（ほぼM.W.L.）

砂浜幅：49m

後浜天端高：D.L.+3.50m（H.W.L.上+1.62m）

後浜幅（水平部分）：25m

ここで、前浜勾配は全国の養浜実施例（例えば、入江ら、1986）を参考として、最も施工例の多い勾配に設定され、砂浜幅は汀線からの距離による利用者密度（佐藤ら、1980）を参考として、50m程度確保することとされた。また後浜天端高は、面的な海岸防護方式の計画・設計マニュアル（（社）日本港湾協会、1991）を参考として、H.W.L.時に年数回来襲する波浪が人工海浜に打ち上げる高さ程度とされた。

### 2. 3 養浜砂の選定

養浜砂は、色調、機能に適する粒径、供給の可能性、経済性などを勘案して、ナガンヌ島沖（チービス）海底砂（比重 2.55、中央粒径 0.7mm）が選定された。

### 2. 4 入射波条件

当該地区において波浪は観測されていない。そこでこの調査では、平良港波浪観測地点で得られた波浪実績をもとに、当該地区における波浪条件を推定している。

#### (1) 汀線変化計算に用いるエネルギー平均波

##### (a) 平良港における波浪出現頻度

平良港における波浪観測位置を図-2. 3に示す。また、この地点で1986年4月から1989年3月に観測された波浪出現頻度を表-2. 1、および図-2. 4に示す。表-2. 1より、波高の増大とともに周期も長くなる傾向があり、波高0.5mで5s、1.0mで6~7s、2mで7~8sの頻度が多いことがわかる。また図-2. 4より、波高の出現頻度は0.0~1.5mの範囲で全体のほぼ95%を占めており、周期の出現頻度は4.0~7.0sの周期で全体の70%を占めていることがわかる。なお、波向き観測は行われておらず、波向きは風向きに一致するものとして推算されている。波向き別波高分布を図-2. 5に示す。図より、波はほぼNNWの方位から来襲することがわかる。

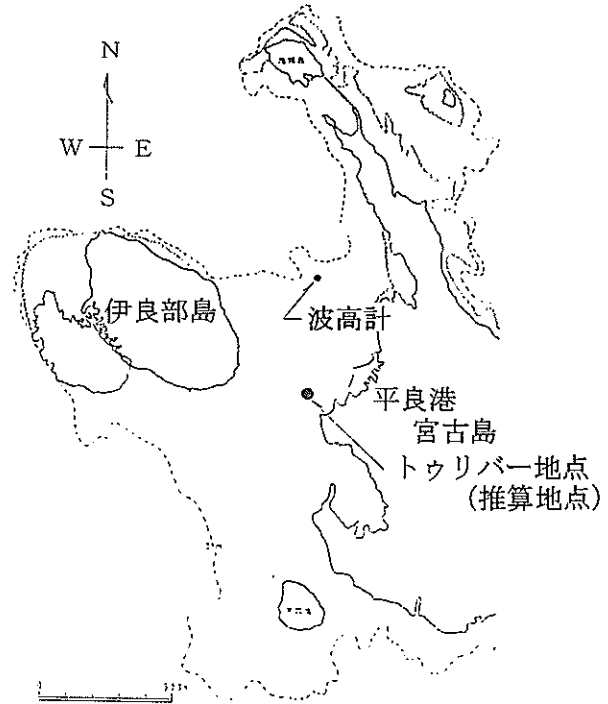


図-2. 3 平良港波浪観測地点

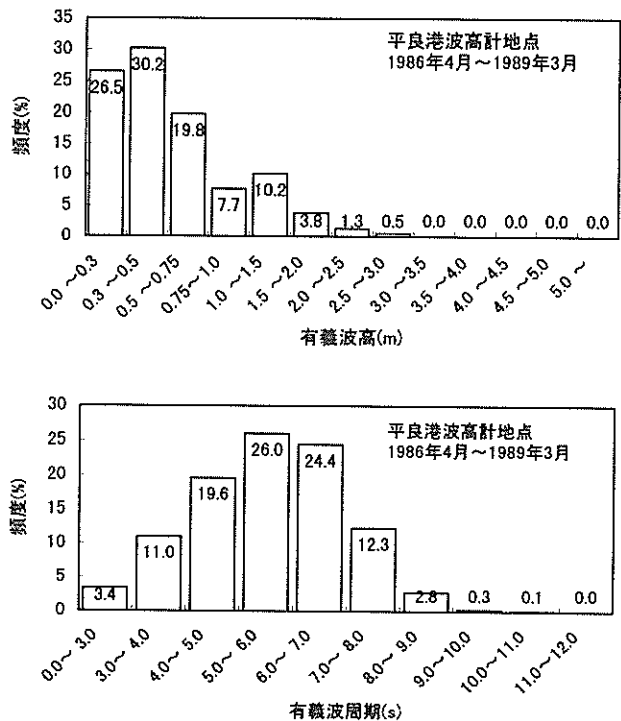


図-2. 4 波浪観測地点における波浪出現頻度

表-2. 1 波高観測地点における波浪出現頻度表

周期(s) 波高(m)	0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 9.0	9.0~ 10.0	10~ 11	11~ 12	計
0~0.3	212 (1.7)	468 (3.7)	804 (6.4)	935 (7.5)	646 (5.2)	206 (1.6)	39 (0.3)	11 (0.1)	1 (0.0)		3322 (26.5)
0.3~0.5	201 (1.6)	716 (5.7)	1030 (8.2)	934 (7.5)	644 (5.1)	233 (1.9)	31 (0.2)	2 (0.0)			3791 (30.2)
0.5~0.75	19 (0.2)	188 (1.5)	515 (4.1)	820 (6.5)	631 (5.0)	268 (2.1)	33 (0.3)	6 (0.0)			2480 (19.8)
0.75~1.0		7 (0.1)	82 (0.7)	309 (2.5)	382 (3.0)	156 (1.2)	26 (0.2)	2 (0.0)			964 (7.7)
1.0~1.5		2 (0.0)	25 (0.2)	238 (1.9)	577 (4.6)	355 (2.8)	66 (0.5)	9 (0.1)	1 (0.0)		1273 (10.2)
1.5~2.0			1 (0.0)	16 (0.1)	167 (1.3)	230 (1.8)	61 (0.5)	1 (0.0)			476 (3.8)
2.0~2.5				1 (0.0)	14 (0.1)	78 (0.6)	64 (0.5)	3 (0.0)			160 (1.3)
2.5~3.0				2 (0.0)		22 (0.2)	27 (0.2)	5 (0.0)	4 (0.0)		60 (0.5)
3.0~3.5							1 (0.0)	2 (0.0)	1 (0.0)		4 (0.0)
3.5~4.0								1 (0.0)			1 (0.0)
4.0~4.5				1 (0.0)				1 (0.0)		1 (0.0)	3 (0.0)
4.5~5.0									1 (0.0)		1 (0.0)
5.0~											0 (0.0)
計	432 (3.4)	1381 (11.0)	2458 (19.6)	3255 (26.0)	3061 (24.4)	1548 (12.3)	348 (2.8)	43 (0.3)	8 (0.1)	1 (0.0)	12535 (100.0)

注) 表中, 上段の数値は出現回数, 下段 ( ) 内の数値は頻度 (%) を示す  
 欠測 ; 617 規定回数 ; 13152 測得率 ; 95.81%

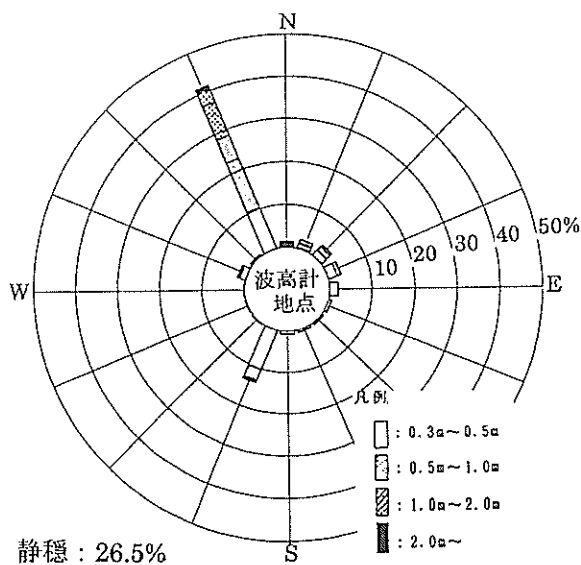


図-2. 5 波浪観測地点における波向き別波高分布

(b) 出現波浪に関する波浪観測地点と推算地点の関係  
 図-2. 3よりわかるように, 平良港波浪観測地点とトゥリバー地区沖合い地点との位置関係からすると, 両地点では, 波高および波向き特性は異なると考えられる。したがって, 平良港波浪観測地点とトゥリバー地区沖合い地点における到達波の関係から, トゥリバー地区沖合い地点の波浪出現頻度を作成した。

到達波の算定方法を次に示す。到達波は, リーフ外縁から侵入する外洋波とリーフ内発生風波のエネルギー合成波とした。ここで, 侵入波は, 回折, 屈折, 浅水変形のほか, 砕波による波高減衰を考慮し, リーフ内発生波は, Wilson の式 (1965) により推算した。

算定された平良港波浪観測地点とトゥリバー地区沖合い地点における到達波高の関係を図-2. 6に示す。



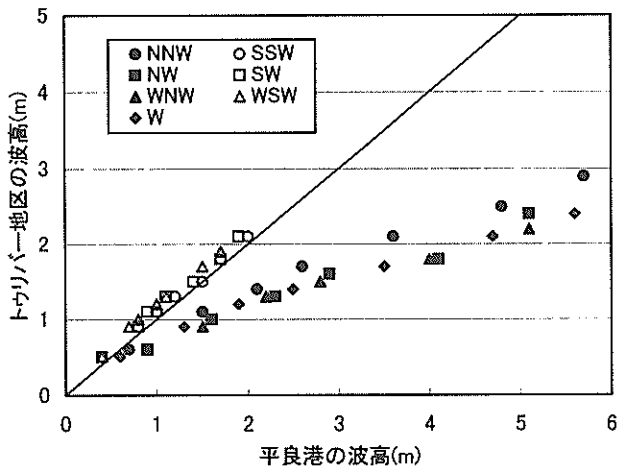


図-2.6 到達波高の関係

(c) トゥリバー地区沖合いの波浪出現頻度

図-2.6に示した到達波高の関係を用いて、図-2.5による波浪観測地点における波向き別波高分布から、トゥリバー地区沖合いの波向き別波高出現頻度を求めると図-2.7のようになる。したがって、推算地点においては、沖波の波向きはNWとSWで代表されることがわかる。

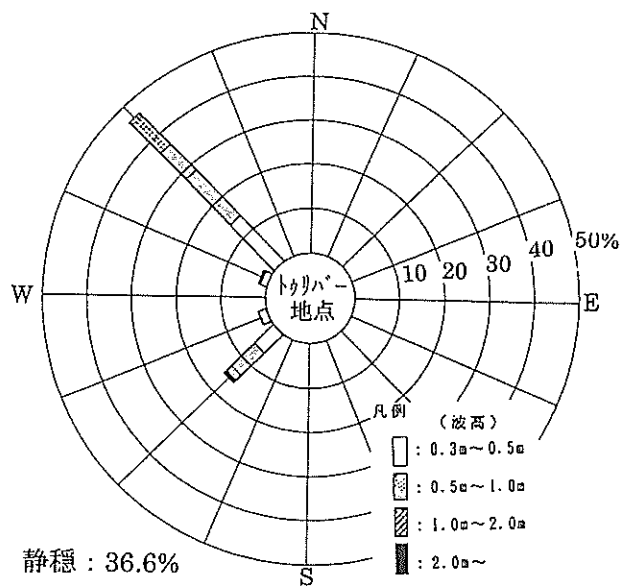


図-2.7 トゥリバー地区沖合いの波向き別波高分布

(d) エネルギー平均波の算定

人工海浜において汀線変化計算を行う場合、年間における波浪エネルギーを代表する波高を知る必要がある。そこで、トゥリバー地区沖合いの波浪頻度をまとめた表-2.2をもとに、式(1)に示すエネルギー平均波の

算定式を用いて、当該推算地点におけるエネルギー平均波を算定した。算定結果を表-2.3に示す。

表-2.2 トゥリバー地区沖合いの波浪頻度

波高(m)	S系		N系		計
	頻度	周期(s)	頻度	周期(s)	
静穏					4586
0.3 ~ 0.5	732	5.0	1902	5.0	2634
0.5 ~ 0.75	906	5.5	1818	5.5	2724
0.75 ~ 1.0	217	6.0	1020	6.5	1237
1.0 ~ 1.5	55	6.5	1139	7.5	1194
1.5 ~ 2.0	16	7.0	130	9.0	146
2.0 ~ 2.5	6	7.5	3	10.0	9
2.5 ~ 3.0	3	8.0	0		3
3.0 ~ 3.5	0	9.0	0		0
3.5 ~ 4.0	1	9.5	0		1
4.0 ~	1	10.5	0		1
計	1937 15.5%		6012 48.0%		12535

(注) N系, S系の合計発生頻度(%)は静穏および対象トゥリバー地区外波向を含む全データ数12535に対する値

$$\text{波高 } \tilde{H} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N H_i^2 \cdot T_i}{\sum_{i=1}^N T_i}} \quad (1)$$

$$\text{周期 } \tilde{T} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2 \cdot T_i}{\sum_{i=1}^N H_i^2} \quad N: \text{データ数}$$

表-2.3 推算地点におけるエネルギー平均波

	S系(SW)	N系(NW)
波高(m)	0.7	0.9
周期(s)	6.0	7.0
頻度(%)	15.5	48.0

(2) 人工海浜の設計波

人工海浜に対する設計波は、年2~3回程度の再現確率を有する荒天時の波諸元(未超過出現率99.2%に相当)とし、1986年4月から1989年3月までの波浪観測データをもとに設定されている。図-2.8に示した平良港波浪観測地点における波高の出現状況より、未超過出現率99.2%に相当する波高は2.42mとなり、この波高に対する周期は8.0s程度となる。

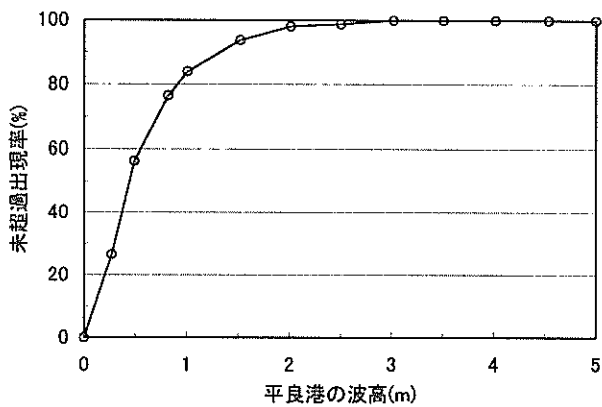


図-2.8 波浪観測地点における波高の出現状況

(a) 沖波

平良港波浪観測地点における代表波は、浅海域の影響を受けているため、沖波の値を推定する際には、波浪変形計算により波浪観測地点における波高比（沿岸係数）を算出して、表-2.4のように沿岸係数で除して換算される必要がある。この表より、沖波諸元は、波向きW方向で得られた波高4.25m,周期8.0sの値が採用された。

表-2.4 沖波換算された波諸元

波高	波高計位置における波高比	沖波換算波高 $H_{01/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)
NNW	0.63	3.84	8.0
NW	0.70	3.46	8.0
WNW	0.68	3.56	8.0
W	0.57	4.25	8.0

表-2.5 人工海浜区域における波高

波向	I工区		II工区	
	波高比	波高	波高比	波高
NNW	23.8	1.00	27.2	1.15
NW	24.5	1.00	27.4	1.15
WNW	24.3	1.00	25.8	1.10
W	23.0	0.95	22.0	0.90
WSW	25.3	1.05	13.2	0.55
SW	26.3	1.10	13.4	0.55
SSW	27.0	1.15	13.4	0.55

(b) 設計波

沖波波高4.25mに対する人工海浜区域での波高は改めて波浪変形計算を実施し、表-2.5のように求められる。ここで、I工区とは南側海浜、II工区とは北側海浜である。

設計波は、両工区とも波高が大きく、かつ発生頻度が卓越する方向を設計波向きとして、表-2.6のように設定される。

表-2.6 人工海浜の設計波

区分	I工区	II工区
波向	SSW	NNW, NW
波高	$H_{1/3}=1.15\text{m}$	$H_{1/3}=1.15\text{m}$
周期	$T_{1/3}=8.0\text{s}$	$T_{1/3}=8.0\text{s}$

(3) 平良港における潮位

平良港検潮所において得られた潮位を図-2.9に示す。設計潮位としては、このなかでH.W.L.を用いた。

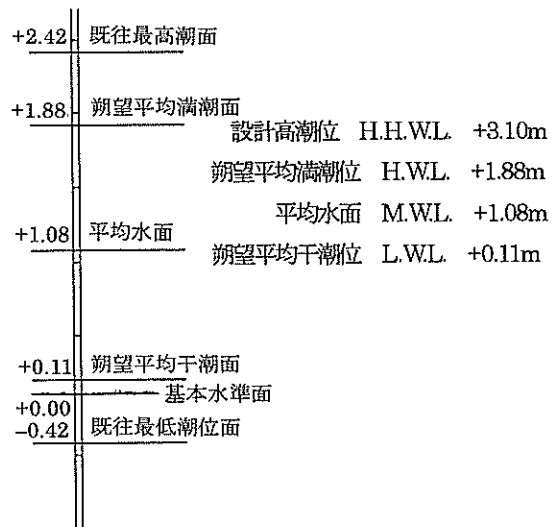


図-2.9 潮位図

2.5 既往調査における海浜変形数値解析結果

(1) 汀線変化

汀線変化の予測は、波浪条件と海岸線形状のデータにより沿岸方向の各点において沿岸漂砂量を算定し、海浜変化を一本の線の変化（前進、後退）による表現する1-lineモデル（例えば、岩垣（1987））により実施されている。なお、漂砂量算定に用いる砕波波高と砕波波向は、沖側領域では不規則波を対象としたKarlsson(1969)のエネギー方程式を用い、浅海域ではスネルの法則による屈折計算、合田（1977）による不規則波の方向分散法を用いた波浪変形計算を実施して求めている。また、沿岸漂砂量の算定には、砕波波高の沿岸方向分布を考慮した小笹・Brampton（1979）の沿岸漂砂量式を用いて

いる。さらに、この数値モデルを当該人工海浜に適用するために、当該人工海浜建設区域に隣接するパイナガマ浜の汀線変化を再現することによりモデルの精度を検証している。本資料では、この再現計算の詳細を付録に示すこととする。

基本計画案および150m突堤案における汀線変化の予測計算結果を図-2.10に示す。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 基本計画案では、南側海浜はほぼ安定するものの、北側海浜の変化が大きく、特に海浜北側で汀線後退量が大きい。
- ② 北側海浜の汀線後退を抑止するためには150m突堤を併用する案が有効である。

(2) 地形変化

地形変化の予測は、波の場の計算、流れの場の計算および地形変化の計算を段階的に行うモデルにより実施されている。ここで、波の場の計算には不規則波を対象とした Karlsson (1969) のエネルギー方程式を用いている。また、流れの場の計算にはラディエーションストレス項を導入した平面二次元の運動方程式を連続式とともに繰り返し計算を行うことにより定常解を得る方法を用いている。さらに、地形変化の計算には、渡辺 (1981)

による漂砂量式と砂の連続式を解く方法を用いている。

基本計画案および150m突堤案における海浜流分布と地形変化量分布の計算結果を図-2.11, 2.12に示す。なお波向きはNWである。得られた結果は以下のようである。

(a) 基本計画案

- ① 北側海浜では全体的に南向きの流れが卓越し、海浜の北側で侵食、南側で堆積傾向を示した。
- ② 南側海浜では中央ヘッドランドの回折効果により背後では弱い反時計回りの流れが形成されるが、その南側では逆回りの循環流を形成している。この流れに呼応して南側海浜の中央で侵食、南側ヘッドランド付近で堆積傾向を示すが、その変化は比較的小さい。

(b) 150m 突堤案

- ① 北側海浜では150m突堤背後で弱い循環流を形成し、海浜内では全体に北向きの流れを示している。海浜内の地形変化は小さく、特に150m突堤による遮蔽域での変化が小さい。
- ② 南側海浜は基本計画案とほぼ同様の流況および地形変化を示す。

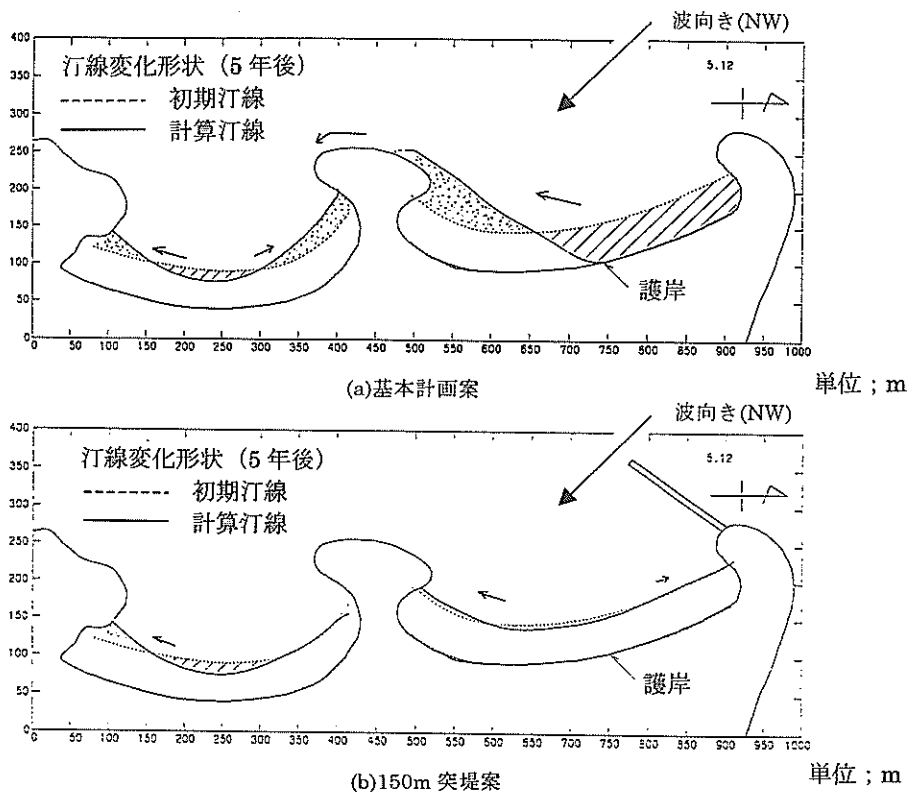


図-2.10 既往調査における汀線変化予測の数値解析結果

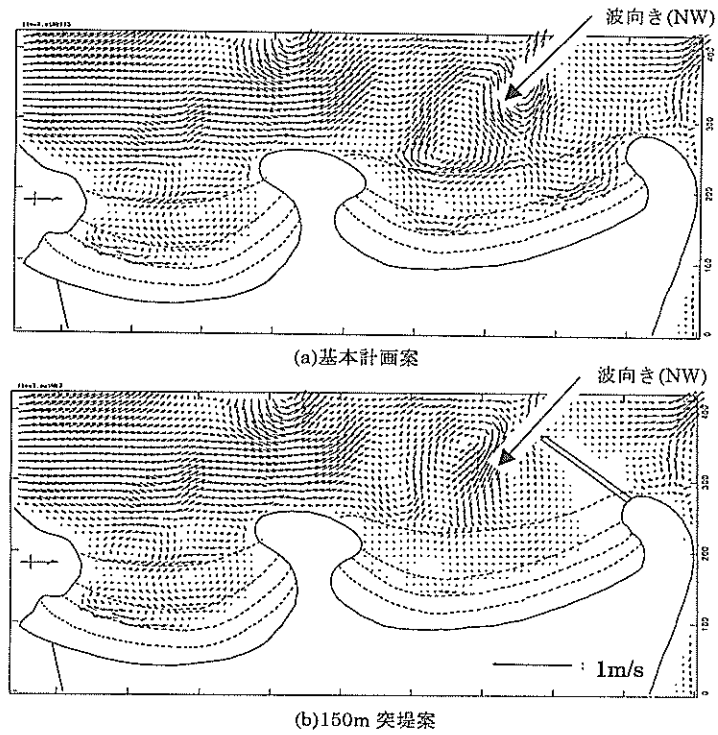


図-2. 11 既往調査における流れ場の数値解析結果

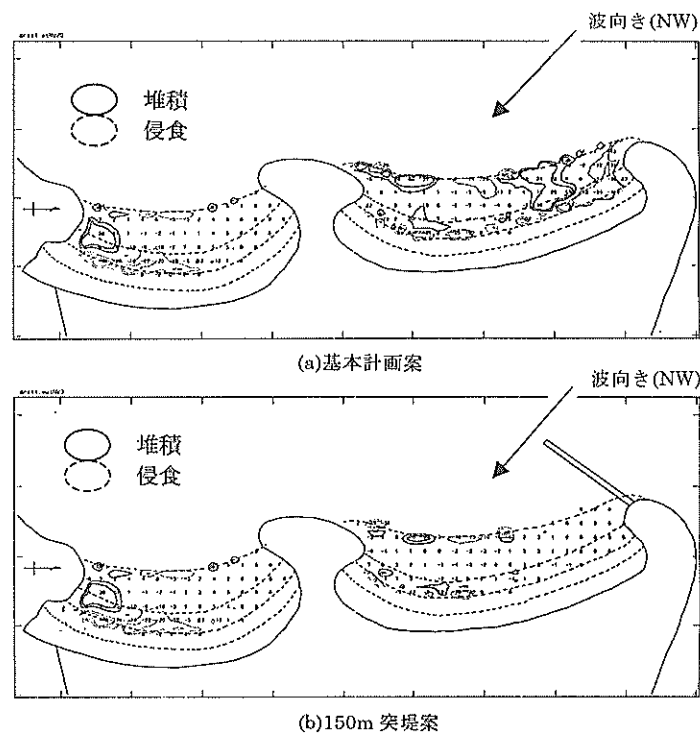


図-2. 12 既往調査における地形変化予測の数値解析結果

### 3. 実験方法

#### 3. 1 実験条件の設定方法

本実験では、運輸省港湾技術研究所の多方向不規則波造波装置を備えた平面水槽（40m×22.8m）を用いた。模型は、水平・鉛直とも歪みのない縮尺 1/50 とした。人工海浜部は後述する模型砂により整形し、その他の大部分はモルタルにより整形した。平面模型の水深分布図を図-3. 1 に、水槽設置平面図を図-3. 2 に示す。ここでフルードの相似則に従うと、各水理量は表-3. 1 のようになる。このことから模型実験に用いる波浪条件は、ひとまず表-3. 2 のように決定される。ここで、波向きおよび方向分散性については、表-2. 3 より、当該人工海浜では N 系の波浪が全体の約 5 割のエネルギーを占めていること、および模型の有効造波領域などを考慮して、波向 NW の一方向波に限って実験を行った。

このとき、人工海浜周辺の海底地形（図-3. 1）より、とくに北側海浜付近では北から南に向かう沿岸流れが発生するものと推測される。そして、この沿岸流れの発生が、既往調査における数値シミュレーションにより図-2. 10, 2. 11 に示したような結果が得られた主たる原因であると考えられる。

表-3. 1 各水理量の縮尺

諸元	縮尺	
平面寸法	$l r$	1/50
水深	$h r$	1/50
波高	$H r = h r$	1/50
波長	$l r = h r$	1/50
周期	$T r = \sqrt{h r}$	1/7.07
流速	$C r = \sqrt{h r}$	1/7.07

表-3. 2 フルードの相似則より求まる波浪条件

種類	波向	波高 $H_{1/3}$	周期 $T_{1/3}$	潮位
平常波浪	NW	0.90m(1.8cm)	7.0s(0.99s)	D.L.+1.08m(+2.16cm)
暴風波浪	NW	1.15m(2.3cm)	8.0s(1.13s)	D.L.+1.88m(+3.76cm)

( ) は模型換算量

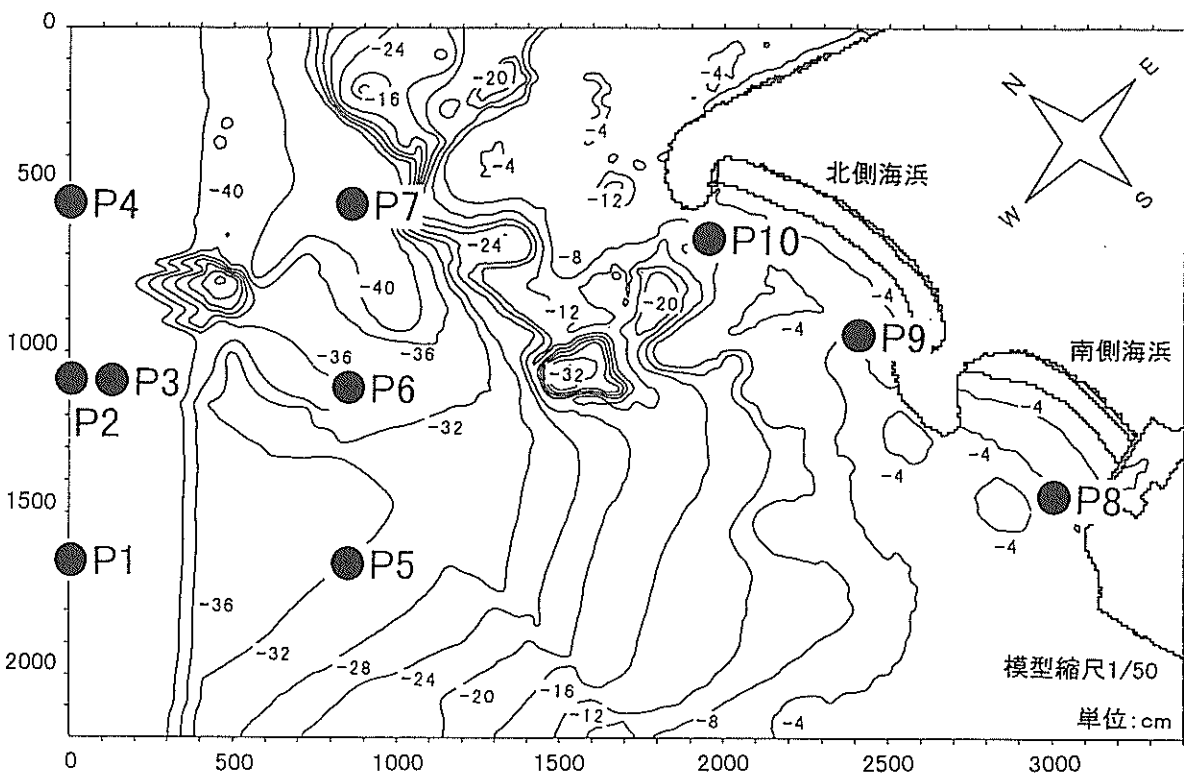


図-3. 1 移動床模型平面図（縮尺 1/50；無歪）

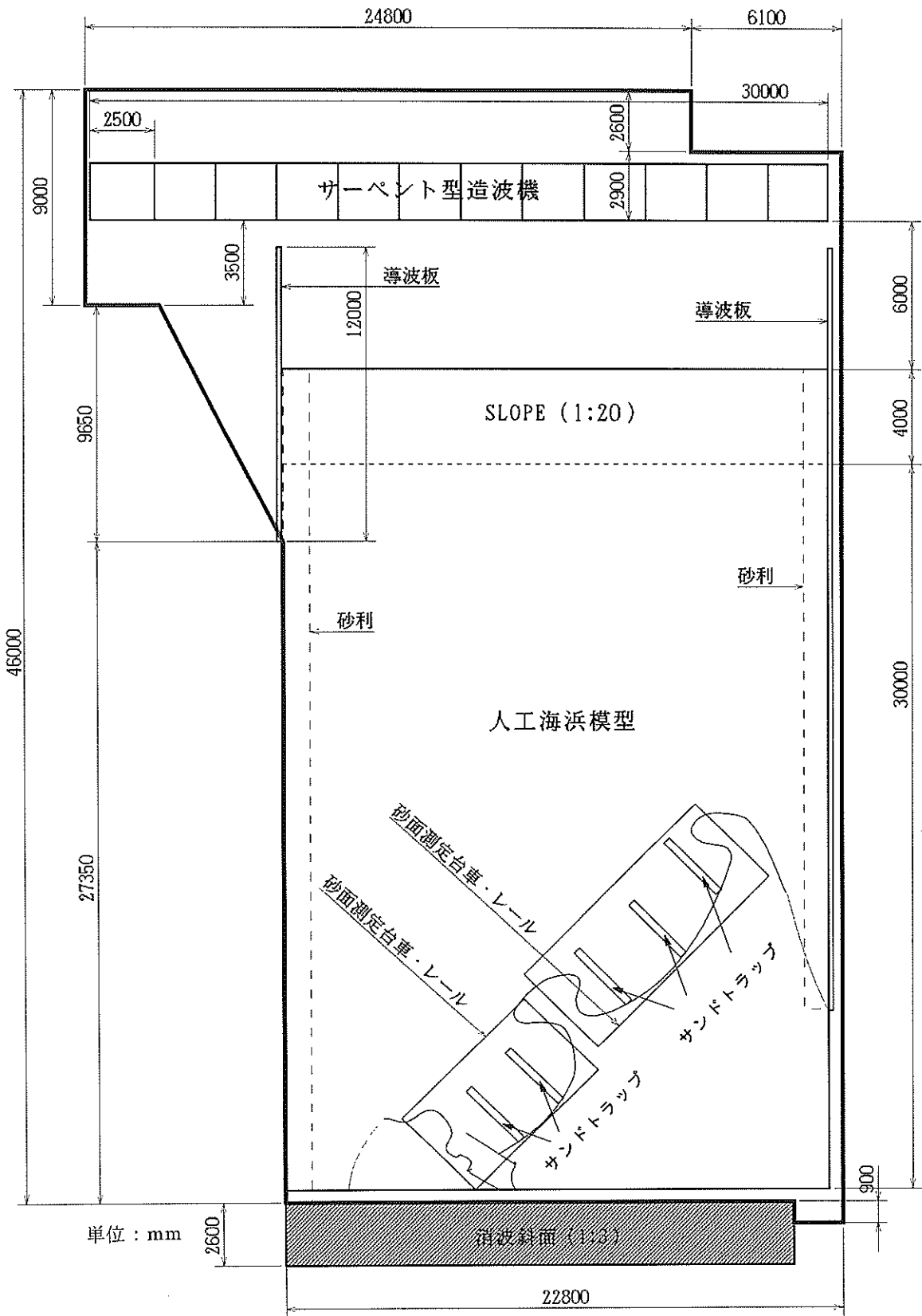


図-3. 2 水槽設置平面図 (運輸省港湾技術研究所・大型水工実験水槽)

しかしながら、波・流れの相似則にはフルードの相似則を適用できるが、漂砂移動を対象とした移動床実験には適切な相似則が未だ確立されていない。そこで、移動床模型の現地に対する相似性を満足するために、本実験では、移動床模型に入射する波浪条件を歪ませることとした。この沖波の歪みの程度は、次節で述べる二次元移動床実験によって得られたリーフ上の流速振幅と移動量の関係を参考として、既往調査における数値解析結果をもとに予備実験および再現実験を行い、本実験に用いる波浪条件を決定することとした。すなわち、予備実験では移動床実験に伴う入射波の歪み度を決定し、再現実験では波の歪み度の妥当性を検討するとともに、移動床実験における時間縮尺を決定することとした。

一方、本実験に用いる養浜砂としては、海浜断面の相似性、漂砂移動の相似性と入手の容易さを考慮して、東北珪砂6号（比重2.63、中央粒径0.23mm）を選定した。なお、海浜断面の相似性の検討には、岩垣・野田（1963）、Nayak（1970）による沿岸砂州発生限界、Sunamura、Horikawa（1974）による海浜プロファイルのタイプ分けなどを用い、暴風海浜型となる模型砂の諸元を検討した。また、漂砂移動の相似性の検討には、Bijker（1968）およびEngelund（1965）による移動形式の分類、佐藤・田中（1962）の移動限界算定式などを用い、模型上の人

工海浜付近で漂砂現象が生じる条件を検討した。

なお実験においては、外力として図-3.1中のP1～P10地点における波高およびP8～P10地点における流速を測定し、移動床部の地形変化の測定には、測定台車に設置された定点式砂面計およびメジャーを用いた。また漂砂量の測定には、砂面計とともに、図-3.2中に示すように岸沖方向に設置された海底床上の小箱からなるサンドトラップを用いた。さらに人工海浜周辺における流況の観測には染料およびフロートを用い、写真・ビデオ撮影により記録を行った。

写真-3.1は移動床平面模型実験の実験風景である。

### 3.2 二次元移動床実験

ここでは、平面移動床実験に先立ち、平山ら（1998）が実施した水平移動床断面二次元実験について説明する。

実験では、長さ40mの不規則波造波水路内に、勾配1/10～1/30の斜面と水平移動床を有する模型を図-3.3のように設置し、モデル化された珊瑚礁地形を再現した。模型縮尺は1/50である。実験の目的は、沖波の波形勾配とリーフ上の模型砂の移動限界との関係を明らかにすることである。実験方法は次のとおりである。まず、2.2で示した波浪条件および潮位から、フルードの相似則を用いて基本となる実験条件を設定した。つぎに、

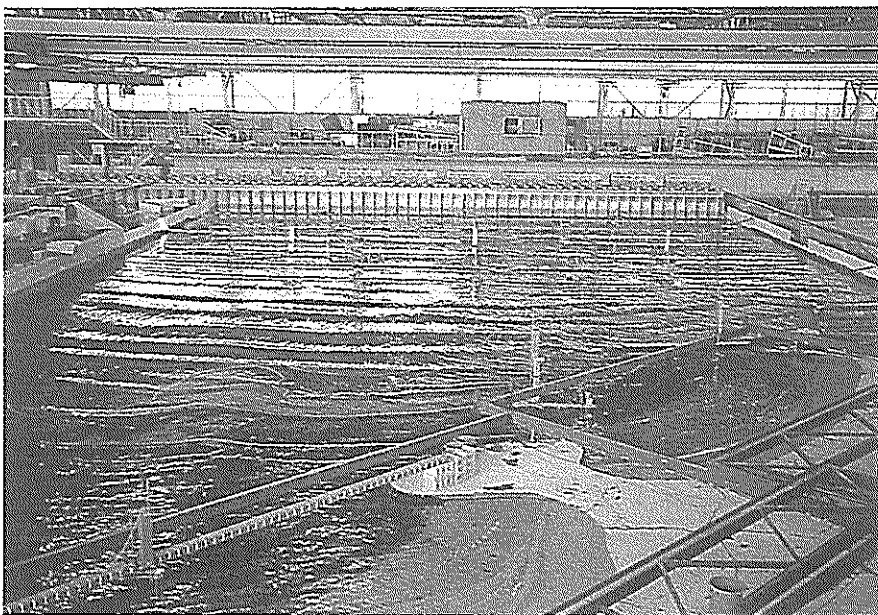


写真-3.1 移動床平面模型実験の実験風景

沖波の波形勾配およびリーフ上の水深を変化させた実験ケースについて、定時ごとにリーフ上の波高、流速振幅を計測し、同時に水平移動床の変化量を計測して模型砂の移動量を推定した。なお、この二次元移動床実験では、後ほど平面移動床実験で用いる模型砂（比重 2.63, 中央粒径 0.23mm）とほぼ同様な条件である豊浦標準砂（比重 2.65, 中央粒径 0.20mm）を模型砂として選定した。また、実験には規則波を用いた。

図-3.4に、リーフ上水深をそれぞれ 5.6cm, 7.6cm とした場合のリーフ上での波高の実験値と首藤 (1974) の浅水係数より得られた計算値を示す。ここで、図中の点線は合田 (1973) の砕波式による砕波限界波高である。図より、ここで設定した実験ケースにおいては、水深 5.6cm では砕波現象を含み、水深 7.6cm では砕波を生じないことがわかる。また、このことは目視によっても確認した。

つぎに、沖波の周期を 1.13s として、リーフ上の波高と模型砂の移動量の関係を生水深ごとにまとめたグラフを図-3.5に示す。ここで、模型砂の移動量は、砂面計により測線に沿って計測された砂面高の単位幅 (mm), 単位時間(秒)あたりの変化量として定義される。図には、あわせて、Madsen ら (1976) による振動流中の漂砂量の算定式により求めた模型砂の移動量の計算値、および佐藤・田中 (1962) による移動限界水深算定式において、移動限界水深をそれぞれ 5.6cm および 7.6cm としたときに得られる移動限界に相当する波高を示してある。非砕波条件である水深 7.6cm の場合には、模型砂の移動量は波高とともに増加し、計算値とも良く一致した。また、波高と模型砂の移動量の関係から、砕波限界に相当する

波高によって模型砂が移動する量は、単位幅あたり  $0.2\text{mm}^2/\text{s}$  であることが読み取れた。しかし砕波を生じる水深 5.6cm の場合には、データのばらつきが大きく、波高値によって模型砂の移動特性を把握することは困難であった。

そこで、水深 5.6cm のときに得られた模型砂の移動量をリーフ上の流速振幅で整理したものを図-3.6に示す。この場合には、砕波現象を含むケースにおいてもある程度模型砂の移動傾向を把握することが可能となり、計算値との対応も良好であった。

ここで、単位幅あたり  $0.2\text{mm}^2/\text{s}$  という値について説明する。この値は、模型砂の移動に伴う砂面形状の変化が造波開始から 5400s 後に定常状態に達したとき、その間の模型砂の移動量が、砂面計測長 500mm 上で平均 2mm 厚の砂層が移動したことに相当する量であると理解される。そこで、ここでは、模型砂の移動量がこの値に達したことをもって、模型砂の移動限界であると定義し、一般に目視によって判定されていた移動限界の定量的な判断基準とした。

この定義に従うと、図より、この実験で用いた模型諸元において、波によるリーフ上の流速振幅が  $0.34\text{m/s}$  (この流速振幅を移動限界流速と定義) 以上となるとき、その流速振幅が現れた場所では底質砂が移動し、上流からの漂砂の供給がない場合には有為な地形変化が生ずると考えられる。さらに、移動床上で移動限界流速が現れる実験波の諸元を調べることにより、砕波の有無に関わらず、実験模型ごとに沖波の波形勾配とリーフ上の模型砂の移動限界を関係づけることができる。

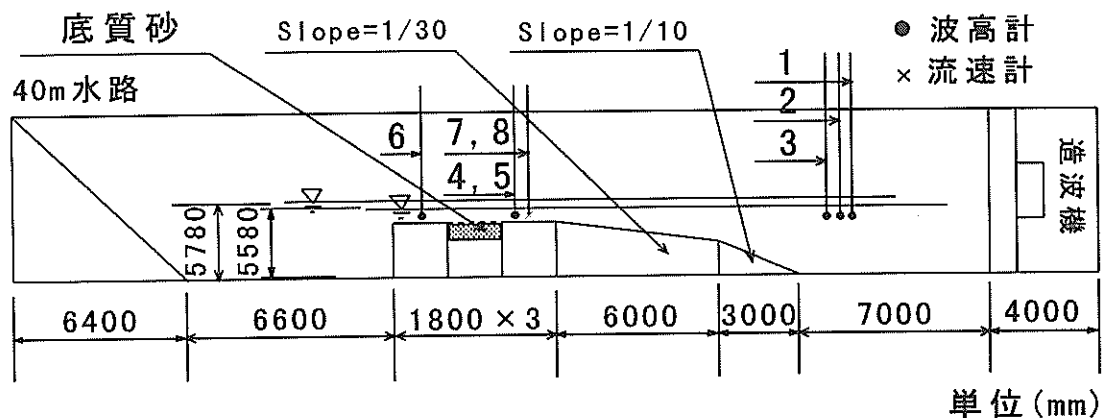
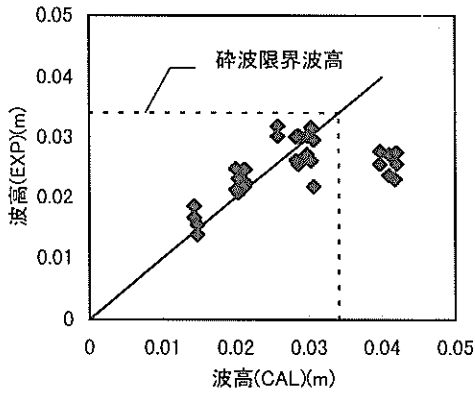
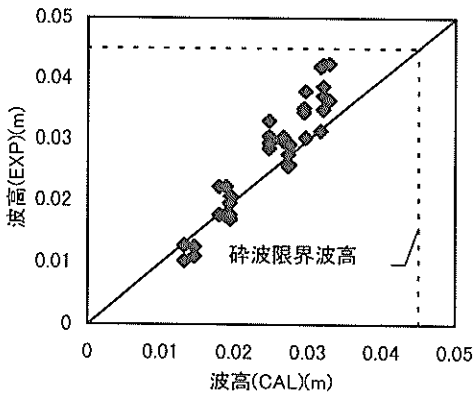


図-3.3 リーフ模型および計測器の配置図



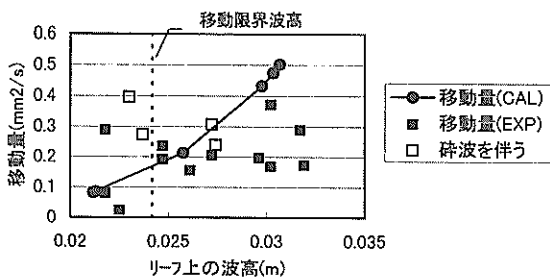


(a)水深 5.6cm (砕波含む)

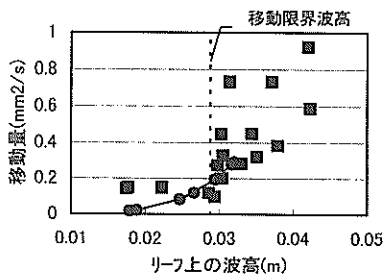


(b)水深 7.6cm (非砕波)

図-3.4 リーフ上の波高の再現性

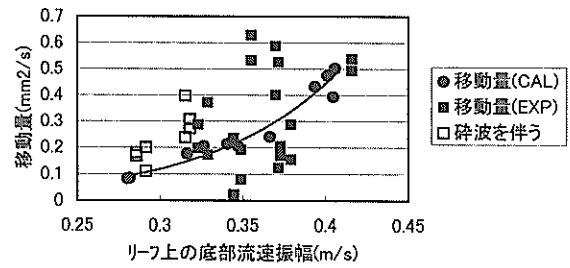


(a)水深 5.6cm (砕波含む)

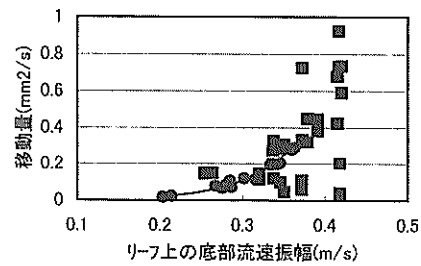


(b)水深 7.6cm (非砕波)

図-3.5 波高と移動量の関係



(a)水深 5.6cm (砕波含む)



(b)水深 7.6cm (非砕波)

図-3.6 流速振幅と移動量の関係

### 3.3 予備実験

#### (1) 再現事象の設定

移動床模型実験における相似則はいまだ確立されていない。そこで、実験において必要とする地形変化を得るためには、フルードの相似則により求められた沖波条件に何らかの歪みを与えなければならない。この歪み度は、一般に地形変化に関する現地観測データをもとに試行錯誤により決定されるものであるが、本実験においては、対象とする人工海浜が現在施工中であるため、現地観測データを得ることができない。そこで、二次元移動床実験によって得られた珊瑚礁リーフ上の流速振幅と模型砂の移動量の関係を参考としながら、既往調査における海浜変形シミュレーションを再現目標として、波の歪み度を決定することとした。なお、移動床部に用いた模型砂の現地養浜砂に対する縮尺は、比重については1、中央粒径については1/3.5である。ここで、沿岸流れが卓越するリーフ上の平面波浪場において断面実験結果を適用することについて、平山ら(1999)は、ブシネスクモデルにより流速振幅の平面分布を推定し、それらと本研究で後述する移動床平面実験で得られた模型砂の移動量との関係を調べることにより、その影響を評価している。これによると、平面波浪場における流速振幅と移動量の関係は、断面模型実験で得られた関係と同様、片対数グラフにおいて右肩上がりの直線で近似できるが、傾きがやや大きくなるようである。すなわち、平面波浪場にお

ける移動限界流速は、みかけ上、断面実験で得られた値(0.34m/s)よりも小さくなっており、これは漂砂の外力として沿岸流れが加わるためであると考えられる。

再現実験において再現されるべき事象は「基本計画案において北側海浜の北側ヘッドランド付近から南へ向かう沿岸流およびその付近における侵食地形が再現され、さらに150m突堤を設置した場合には沿岸流が消滅し南側海浜とともに北側海浜の養浜砂が安定することが再現される」ことである。

しかしながら、漂砂現象をうまく再現する沖波諸元を即座に見つけ出すことは困難であるため、本実験では、再現実験を行う前に以下の4項目について、基本計画案の施設配置を再現した平面模型を用いて予備実験を行った。

- a) 人工海浜周辺の流れ場の再現性
- b) 沖波の波形勾配に対する流れ場変化
- c) 水槽特性
- d) 汀線・地形変化傾向に対する再現性

(2) 再現実験に用いる沖波条件の設定

(a) 人工海浜周辺の流れ場の再現性に関する検討

基本計画案における人工海浜周辺の流れ場の実験結果を図-3.7に示す。入射波条件は、現地設計波をフルードの相似則により模型量に換算した $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.13\text{s}$ の不規則波であり、波向きはNWである。平面模型に染料を流して流況を観察したところ、北側海浜では北側ヘッドランド付近から南へ向かう沿岸流れ、そして北側海浜中央付近では沖向きの流れが観測され、南側海浜では、汀線付近には沿岸流れがみられないなどの傾向が示された。これは、図-2.5に示した数値解析結果と定性的に一致している。ここで、本実験では水平および鉛直方向に歪みのない平面模型を用いており、波・流れ場に関してはフルード則が成り立つことから、複雑なリーフ地形を再現した本実験における平面模型は、当該地区において平成5年度に実施された波浪変形計算による波・流れ場の予測結果を再現する模型であるといえる。

(b) 沖波の波形勾配に対する流れ場変化に関する検討

本実験で用いた平面移動床模型は、人工海浜周辺の波・流れ場の相似性を重視して無歪みで整形されているため、漂砂特性に関する相似を満足するためには、沖波条件に歪みを与える必要がある。すると、沖波条件がフルードの相似則に対して歪むことになり、このとき、人工海浜周辺の流れ場が変化する可能性がある。そこで、沖波の波高および周期をそれぞれ変化させたときの人工海浜周辺の流速分布、および代表点における流速値につ

いて検討を加えた。

沖波を $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.27\text{s}$ とした場合、および $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.41\text{s}$ とした場合における人工海浜周辺の流れ場の実験結果をそれぞれ図-3.8、図-3.9に示す。沖波の波形勾配がフルード則より設定される条件より大きくなるほど、北側ヘッドランドから南へ向かう沿岸流が顕著に現れるようになるが、流れ場が大きい

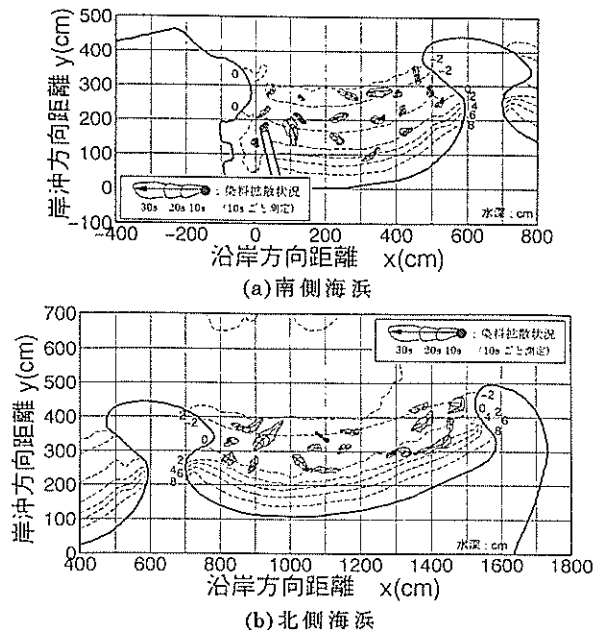


図-3.7 基本計画案における平面模型上の流れ場 ( $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.13\text{s}$ )

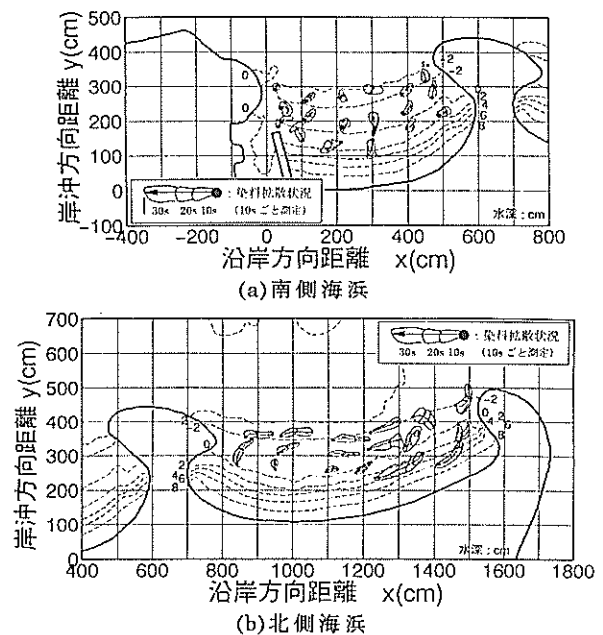


図-3.8 基本計画案における平面模型上の流れ場 ( $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ )

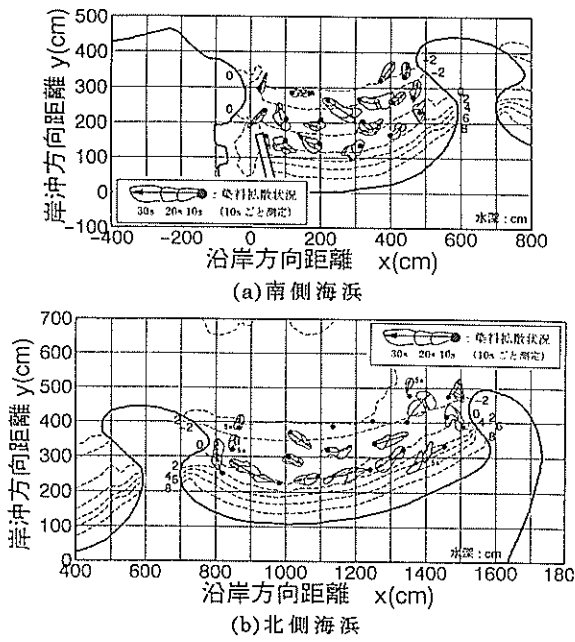


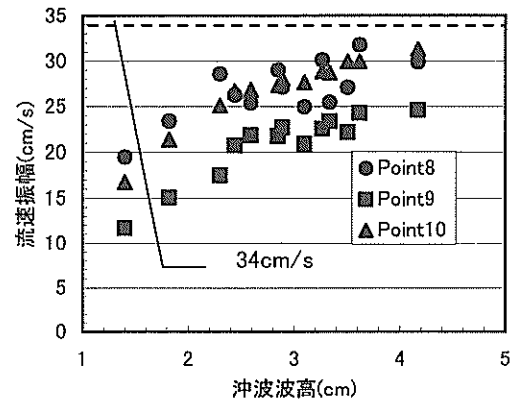
図-3.9 基本計画案における平面模型上の流れ場  
( $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ )

く変化する様子はみられない。したがって、沖波の波形勾配を大きくしても、沿岸漂砂の移動傾向が変化することはないと考えられる。

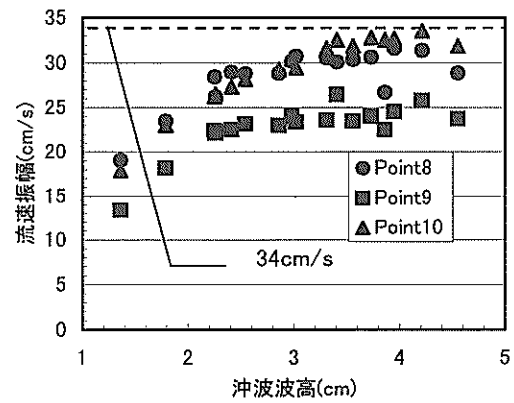
一方、人工海浜近傍の代表点P 8～10における流速振幅の値を、沖波の各周期ごとに、沖波の波高の変化に対応させて示した実験結果を図-3.10に示す。いずれの周期においても、沖波の波高が増加すると流速振幅の値も増加し、かつ  $H_{1/3}=2.3\sim 3.0\text{cm}$  付近に流速振幅の増加率が減少する変曲点が存在することがわかる。これは、リーフ上の波の砕波によるものと考えられる。

沖波の周期が  $T_{1/3}=1.13\text{s}$  のとき、既往調査において侵食傾向を示さないと推測されるP 8, P 9地点では、流速振幅値の変曲点より右側でほとんど直線の傾きがゼロ、すなわち流速振幅値の増加が頭打ちとなっているのに対し、顕著な侵食地形が形成されるP 10地点では、なおも右肩上がりの直線となり、波高の増加とともに流速振幅値がさらに増加することがわかる。

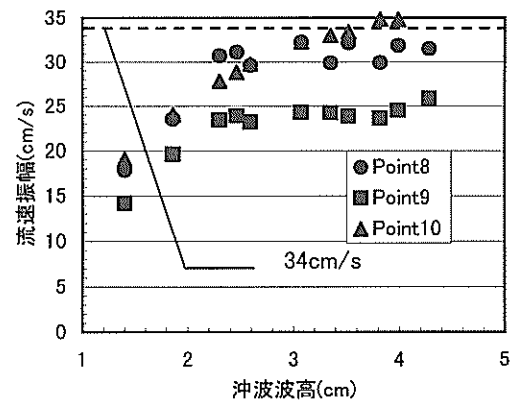
このような傾向は、沖波の周期が  $T_{1/3}=1.27\text{s}$  のとき、あるいは  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  のときも同様にみられるが、各地点で観測される流速振幅の値は、周期が長くなるほど全体的に大きくなっている。ただし、変曲点の位置は、周期の増加に伴い沖波波高が大きくなる方向に移動している。沖波の周期を変化させてもなお流れ場、あるいは流速振幅値の変化に一貫した傾向が見出される理由の一つとしては、対象としたリーフ上の海域において、顕著な沿岸流が形成されていることが挙げられる。



(a)  $T_{1/3}=1.13\text{s}$



(b)  $T_{1/3}=1.27\text{s}$



(c)  $T_{1/3}=1.41\text{s}$

図-3.10 沖波条件に対する流速振幅の変化

このように、沖波の波形勾配の変化に対して流れ場が大きく変化することなく、かつ流速振幅値の変化には一貫した傾向がみられ、とくに顕著な侵食地形となるP10では変曲点より右側でも流速振幅値が増加するという結果は、漂砂移動を相似させるための沖波条件の決定上、極めて有利である。そこで図-3.10を用いて、平面移動床実験に用いる沖波条件を、流れ場の相似性、および模型砂の移動限界流速の観点から、次のように推定する。移動床上のある地点において、その地点の模型砂が移動するためには、断面二次元実験で得られた移動限界流速（本実験では0.34m/s）を上回る流速振幅値が観測される必要がある。図においては、 $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.41\text{s}$ という沖波条件がこれに当てはまる。かつ、このとき侵食傾向を示さないP8、P9においては移動限界流速を下回る流速振幅値しか観測されていない。したがって、このように決定された波諸元を本実験に適用することにより、本実験は漂砂移動を定性的に相似させることができると考えられる。

(c) 水槽特性に関する検討

本実験では砂移動による移動床の変化を得ることを目的としているため、長時間にわたる造波が必要となる。このような場合、水槽あるいは模型形状の特性により、水槽内に現地海域では存在しない定常的な流れが発生することがある。そこで本実験では、入射波として考えられる代表的な波浪条件を用いて規則波および不規則波による3時間の連続造波を行い、代表地点P1~P10における平均水位および平均流れの変化を観察した。ここでは図-3.11に示すように、水槽座標と流向との関係は、 $x$ 方向の平均流れを $u$ 、 $y$ 方向の平均流れを $v$ とし、それぞれ、 $x$ 軸の負の向きが $u$ の正の向き、 $y$ 軸の正の向きが $v$ の正の向きと定義した。

図-3.12はフルード則より得られる $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.13\text{s}$ の不規則波を造波した場合の人工海浜前面のP8、9、10における平均水位および平均流れの変化を示したものである。平均水位はいずれも下降傾向であり、造波開始3時間後には初期水位に比べ0.3cm低下していることがわかる。また、平均流れは造波初期には各代表地点やその方向で多少のばらつきがみられるが、造波開始から1.5時間後にはほぼ安定することがわかる。ただし、P9における $u$ 方向の平均流れの変化はやや大きくなっている。同様に、図-3.13は $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.27\text{s}$ の不規則波を造波した場合、図-3.14は $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.41\text{s}$ の不規則波を造波した場合における平均水位および平均流れの変化を示したものである。これらの条件では、造波時間の経過に伴う平均水位の変

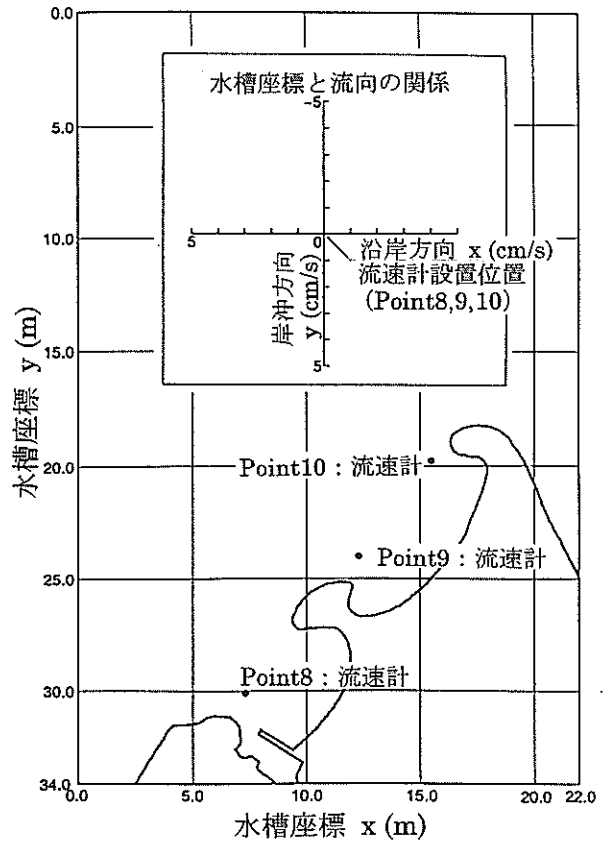


図-3.11 水槽座標と流向の座標定義

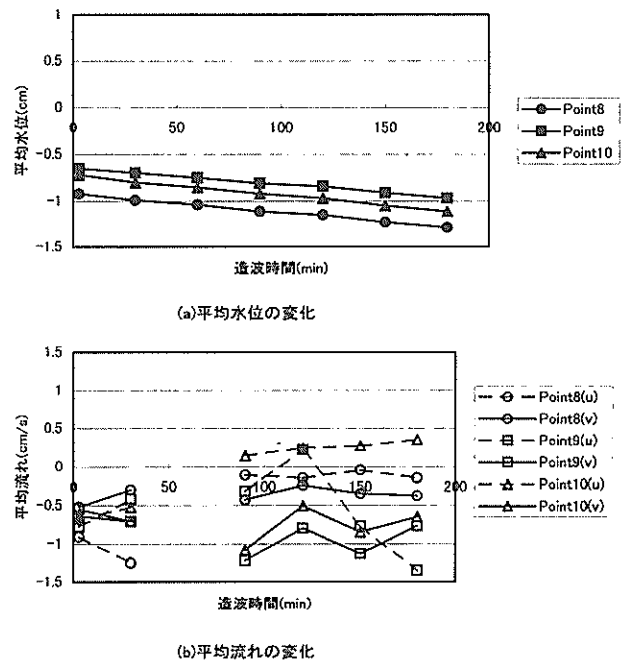
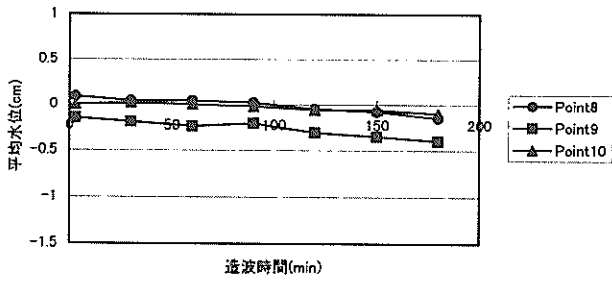
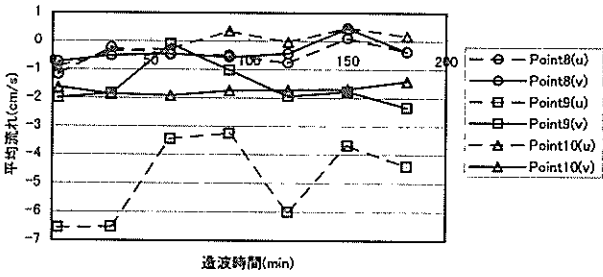


図-3.12 平均水位・流れの定常性 ( $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.13\text{s}$ )

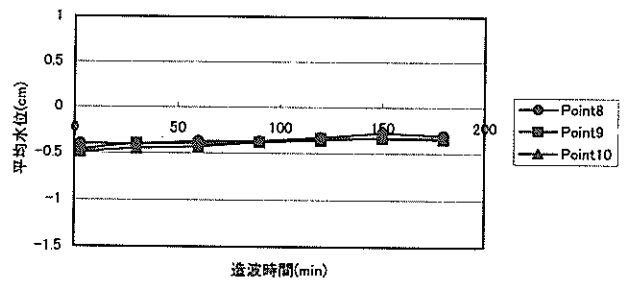


(a)平均水位の変化

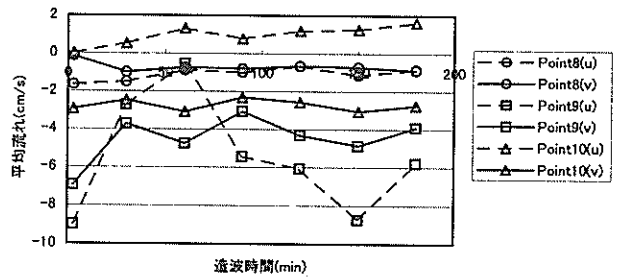


(b)平均流れの変化

図-3. 13 平均水位・流れの定常性  
( $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ )



(a)平均水位の変化



(b)平均流れの変化

図-3. 14 平均水位・流れの定常性  
( $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ )

化はほとんどみられなくなるが、平均流れの変化が全体的に大きくなる傾向がみられる。しかしながら、P9を除けばその変化は1.0~2.0cm/sの範囲に収まっており、それほど有意ではない。P9は北側人工海浜の南端付近にあり、北側海浜に生じる沿岸流れが沖向きの流れに変化する位置にあるため、流れ場が定常になりにくいのではないかと考えられる。したがって本実験では、長時間造波に伴う水槽特性の影響はそれほど大きくないと考えられる。

一方、各代表地点の平均流れについて図-3. 12から図-3. 14をそれぞれ比較すると、沖波の波高や周期が大きくなるにつれて、 $u$ および $v$ は、造波時間の経過に伴う変化の傾向を保ちながら、その値が大きくなっていることがわかる。これは、 $u$ 、 $v$ から得られる各代表地点の平均流れベクトルの向きが同じで大きさが大きくなることを意味する。したがって、人工海浜周辺の平均流れは、沖波の波形勾配の変化に対しても向きを変えずに、沖波の波高や周期の増加に伴い大きくなることわかる。

(d) 汀線変化および断面変化に関する検討

人工海浜周辺の流況観察に並行して、3時間造波後の両海浜の汀線変化、および北側海浜の北側ヘッドランド近傍の代表断面における断面変化を観察した。図-3. 15に基本計画案における汀線変化に関する実験結果を

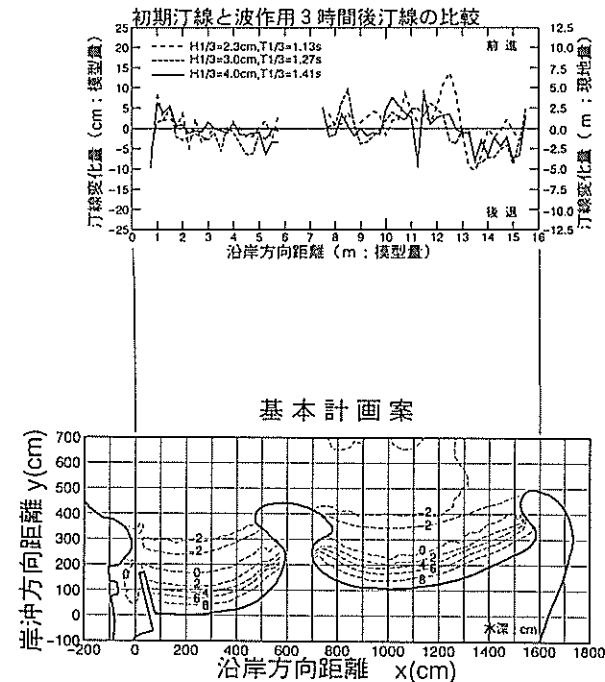


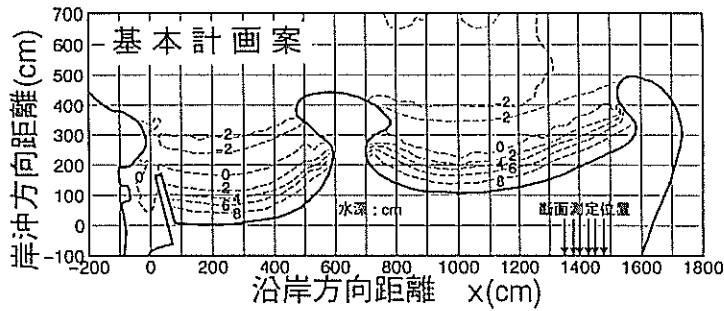
図-3. 15 造波3時間後の汀線変化

示す。沖波条件をフルード則より得られた  $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.13\text{s}$  とした場合には、北側海浜の北側ヘッドランド付近で局所的に汀線が後退する部分と前進する部分が見られるが、北側海浜全体に及ぶような汀線変化はみられず数値計算結果とは異なる傾向を示した。一方、沖波

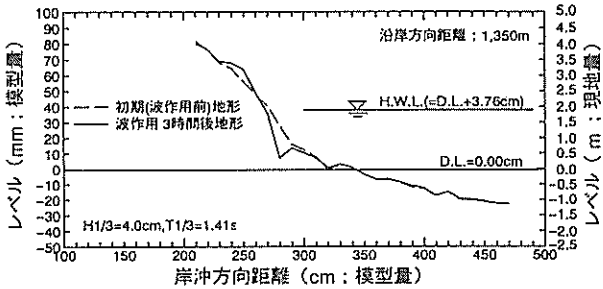
条件を  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$  あるいは  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  とした場合には、北側海浜の北側ヘッドランド付近で汀線が後退し、北側海浜中央から南側にかけて汀線が前進する様子が観察され、数値計算により予測された汀線変化の傾向に最も近い実験結果を得た。なお、南側海浜では、いずれの沖波条件を用いた場合にも顕著

な汀線変化はみられなかった。

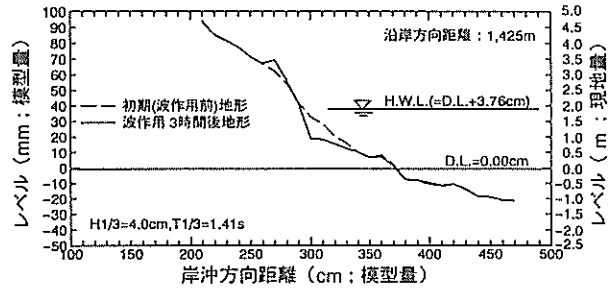
つぎに、沖波条件を  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  とした場合において、汀線が後退した北側ヘッドランド近傍の代表断面の変化を図-3.16に示す。図より、水面を境に沖側で侵食された養浜砂が岸側に打ち寄せられ、汀線付近に堆積してバームを形成していることがわかる。



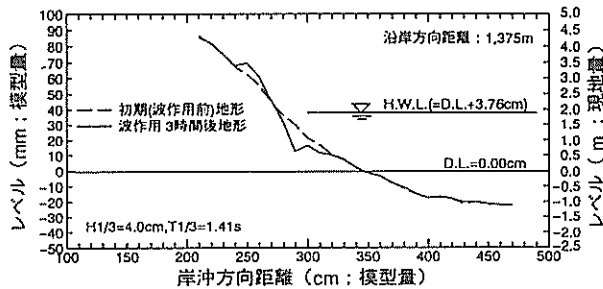
(a)代表断面の位置 (基本計画案)



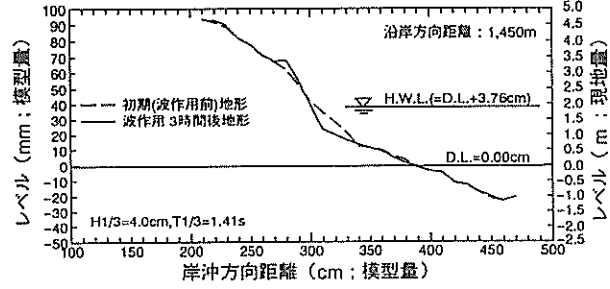
(b)沿岸方向距離 ; 1350cm



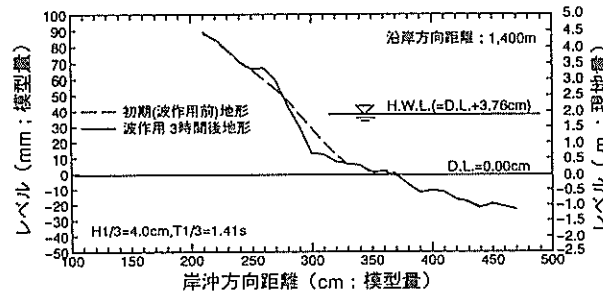
(e)沿岸方向距離 ; 1425cm



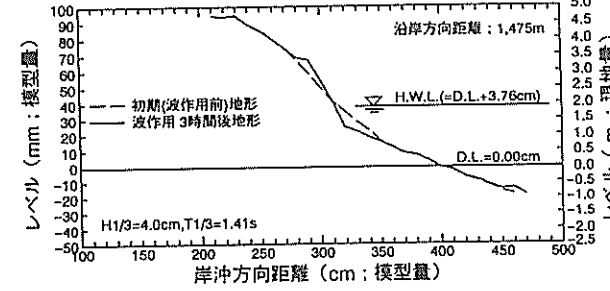
(c)沿岸方向距離 ; 1375cm



(f)沿岸方向距離 ; 1450cm



(d)沿岸方向距離 ; 1400cm



(g)沿岸方向距離 ; 1475cm

図-3.16 北側ヘッドランド近傍の代表断面の変化

以上のような項目(a), (b), (c)および(d)に関する検討結果より次のようなことが明らかとなった。

- ① 現地設計波にフルードの相似則を適用して求められた  $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.13\text{s}$  の沖波条件を用いて造波したところ、基本計画案において、人工海浜周辺で数値計算結果と同様な流速分布が得られた。
- ② フルードの相似則より求められた沖波の波形勾配を大きくして造波し、人工海浜周辺の流速分布を調べたところ、フルード則より求まる条件と比べて、流況に大きな差異は認められなかった。一方、代表点における流速振幅値は、侵食傾向が認められる地点において、沖波の波高が大きくなるほど、周期が長くなるほど大きくなる傾向が得られた。また、海浜の侵食が予想される地点で断面二次元実験より得られた移動限界流速を上回る流速振幅が観測される沖波条件は、 $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  であることがわかった。一方、リーフ上で波が砕波することにより、その他の地点では、 $H_{1/3}=2.3\text{cm}\sim 3.0\text{cm}$  付近を境に、沖波の波高が大きくなっても流速振幅が増加しないことが明らかとなった。
- ③ 3時間の長時間造波を行った場合において、顕著な水槽固有の流れの発生は認められなかった。
- ④ 3時間の長時間造波を行った場合において、沖波条件を、 $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$  あるいは  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  としたとき、移動床模型において観測される人工海浜の汀線変化の傾向は数値計算結果のそれと定性的に一致することが確認できた。

よって、基本計画案および150m突堤案の再現実験に用いる沖波条件は、

沖波条件： $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$

として設定した。

### (3) 再現実験における実験条件の設定

現地の人工海浜では、穏やかな波浪や荒天時の波浪の作用、さらには潮位変動や飛砂の影響を受けて海浜が形成される。つまり、このような海浜の形成過程を考えると、造成直後の海浜にいきなり暴風波浪を作用させるよりも、平常波浪を作用させた後に暴風波浪を作用させて海浜の形成過程を再現することが妥当である。

そこで再現実験では、平常波浪を10時間作用させた後に、暴風波浪を10時間作用させ、海浜変形の再現を試みた。ただし、波作用時間については、模型時間縮尺に関する検討結果によっては見直しを要する条件になる。

ここで平常波浪時の沖波条件は、先の検討により決定された暴風波浪時の沖波条件の歪み度より決定する。

現地海域における異常波浪時の沖波条件は

$H_{1/3}=1.15\text{m}$ ,  $T_{1/3}=8.0\text{s}$  であるから、フルードの相似則に従うと、それぞれ2.3cm, 1.13sとなる。したがって、暴風波浪時の沖波の歪み度は次のとおりである。

波高の歪み度： $4.0\text{cm}/2.3\text{cm} = 1.74$

周期の歪み度： $1.41\text{s}/1.13\text{s} = 1.25$

現地海域における平常波浪時の沖波条件は  $H_{1/3}=0.90\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.0\text{s}$  であるから、フルードの相似則に従うと、それぞれ1.8cm, 0.99sとなる。この値に上記の歪み度を適用すると、平常波浪時の沖波条件は次のように求められる。

平常波浪時の沖波波高： $1.8\text{cm}\times 1.74 = 3.12\text{cm}$

平常波浪時の沖波周期： $0.99\text{s}\times 1.25 = 1.24\text{s}$

暴風波浪時の歪み度から求められる平常波浪時の沖波条件は、沖波の歪み度の検討に用いた波高3.0cm, 周期1.27sとほぼ一致する。このことから、本実験では再現実験に用いる波浪条件を表-3.3のように決定した。

表-3.3 再現実験に用いる沖波条件

平常波浪時	$H_{1/3}=3.0\text{cm}$ , $T_{1/3}=1.27\text{s}$
暴風波浪時	$H_{1/3}=4.0\text{cm}$ , $T_{1/3}=1.41\text{s}$

### 3.4 再現実験

予備実験では、移動床模型実験における沖波の歪み度を決定した。したがって再現実験では、平成5年度に実施された、基本計画案および150m突堤案に関する海浜変形および海浜周辺の波・流れの数値解析結果を再現目標として、設定された歪み度の妥当性と、本実験における模型時間縮尺の推定を行う。

再現実験は次のような手順で実施した。まず整形された初期地形に対して平常波浪時における沖波 ( $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ ) を10時間造波し、人工海浜の地形および汀線測定、P1~10地点の水位とP8~10地点の流速を測定する。つぎに暴風波浪時における沖波 ( $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ ) を10時間造波して同様の計測を行い、波作用時間の経過に対して系統的な地形・汀線変化を調べ、人工海浜の安定性を判断するデータとして活用する。ここで潮位条件は、朔望平均満潮位 (D.L.+3.76cm(現地+1.88m)) で一定とした。これは、実験が主に海浜変形の度合いを調べることを主眼とし、海浜に作用する波浪が大きくなる条件を用いることが妥当と判断されること、あるいは入射波の検定をすべて朔望平均満潮位で行っており、そこで得られた波浪特性が潮位の変動により変化することを防ぐためなどの理由に


波作用時間	0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0h 0 5h 
波浪種類 波浪諸元 潮位・波向	← 平常波浪 → ↔ 暴風波浪 → ← 暴風浪 → $(H_{1/3}=3.0\text{cm}, T_{1/3}=1.27\text{s})$ $(H_{1/3}=4.0\text{cm}, T_{1/3}=1.41\text{s})$ (左記と同じ) (潮位: H.W.L. = D.L. +3.76cm, 波向: NW; すべて共通)
砂面整形 地形測定 汀線測定 水位・流速測定 沿岸漂砂量測定 流況・漂砂動向観察	◎(本均し) ○(粗均し) ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ← 波作用中30分ごとに実施 → □(設置) ○ 【20時間の波作用後に暴風波浪, 平常波浪の順にトレーサーによる漂砂動向, フロート・染料による表層流況観察を実施】

図-3. 17 再現実験の手順

よる。再現実験の手順を図-3. 17に示す。模型の時間縮尺はこれらの地形変化傾向および変化量より決定する。

(1) 基本計画案

人工海浜周辺の流況は、予備実験において既に確認したとおり、既往調査における波・流れ場の計算結果と比較すると、a. 北側海浜北側の汀線付近で顕著な南向きの沿岸流がみられること、b. 海浜中央付近における離岸流および中央ヘッドランド背後での循環流が発生すること、c. 南側海浜の汀線付近に沿岸流がみられないことなどから、計算結果とほぼ同様な流況を示していることがわかる(図-3. 18)。

汀線変化の実験結果を図-3. 19に示す。図は、既往調査における数値シミュレーション結果と定性的に同様な変化傾向を示しており、再現性は良好である。ただし、造波20時間後において、南側海浜ではほぼ安定形状に達しているものと判断されるが、北側海浜ではなお汀線が変化し続けており、安定形状の把握には波作用

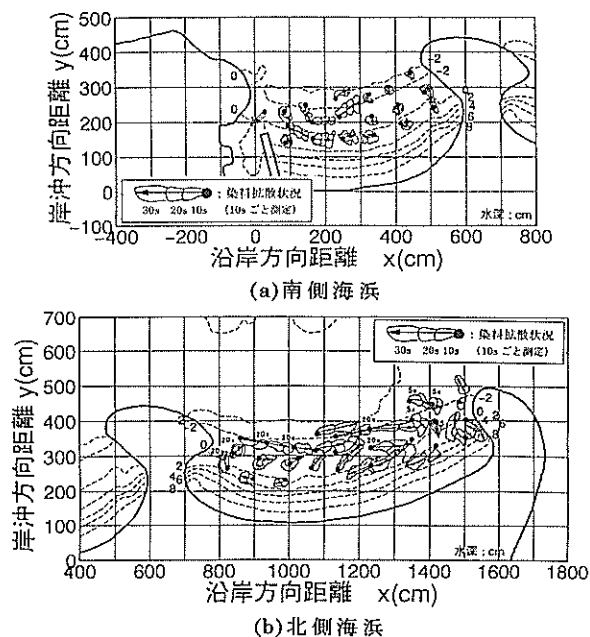


図-3. 18 基本計画案における再現実験結果(平常波浪時:  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$  の流れ場)



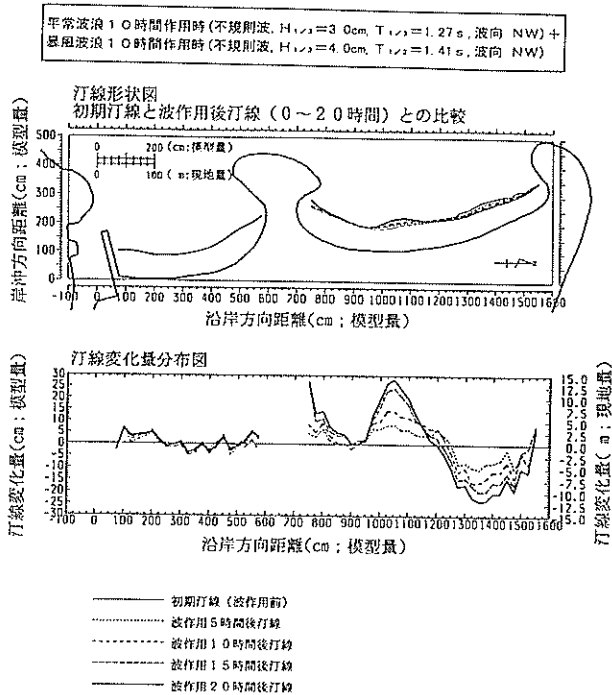


図-3. 19 基本計画案における再現実験結果 (汀線変化)

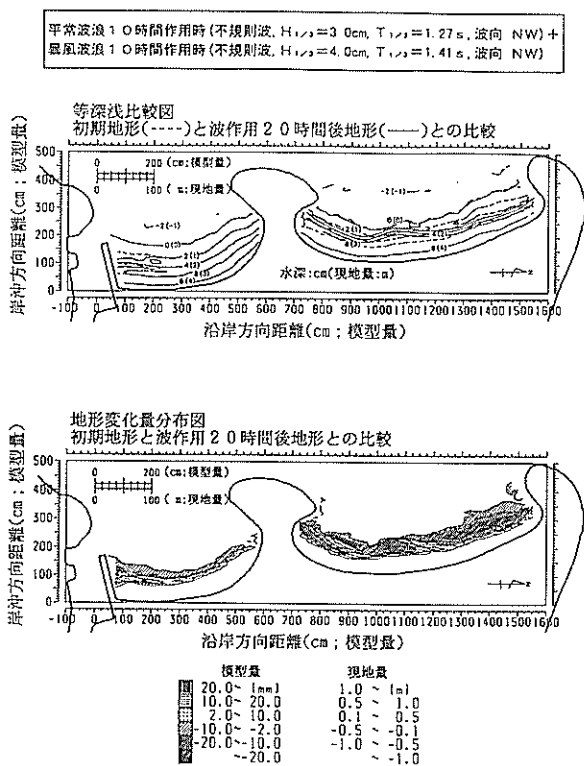


図-3. 20 基本計画案における再現実験結果 (地形変化)

時間の追加を要する。したがって、海浜安定実験に用いる波作用時間の決定には、現地に対する模型の時間縮尺についての検討を行い、再現期間の検討等を行う必要がある。

地形変化の実験結果を図-3. 20 に示す。図は、既往調査における数値シミュレーション結果、すなわち「北側海浜北側で顕著な侵食現象、南側で顕著な堆積現象を生じ、かつ南側海浜で海浜変形をほとんど生じない」という再現目標と定性的に同様な変化を示しており、再現性は良好である。

### (2) 150m 突堤案

人工海浜周辺における流況分布を図-3. 21 に示す。既往調査における波・流れ場の解析結果と比較すると、a. 基本計画案でみられた北向きの沿岸流が消滅していること、b. 北側海浜では海浜南側から中央にかけて北向きの沿岸流が生じ、150m 突堤付近では沖向きの流れに転じていること (循環流の形成)、c. 南側海浜の汀線付近に沿岸流がみられないことから、計算結果とほぼ同様な流況を示していることがわかる。

汀線変化の実験結果を図-3. 22 に示す。図は、既往調査における数値シミュレーション結果と定性的に同様な変化を示し、再現性は良好である。特に造波 20 時間後において、両海浜とも汀線はほぼ安定形状に達しており、これ以上波作用時間を追加しても、有意な変化は生じないと考えられる。

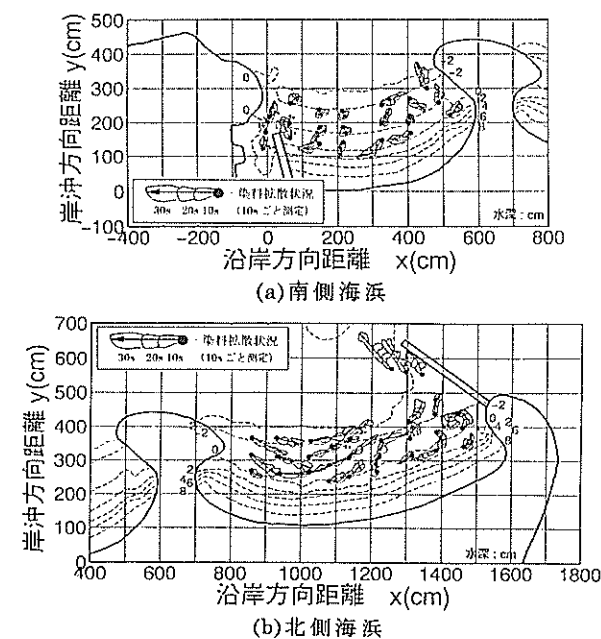
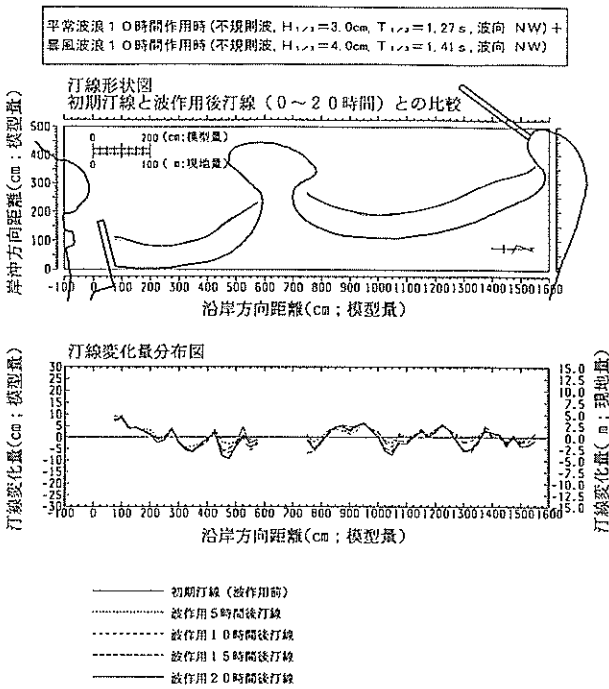
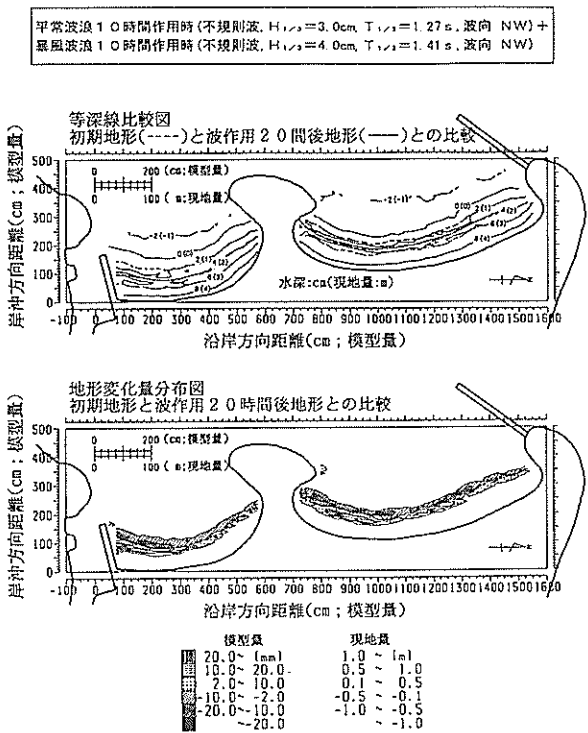


図-3. 21 150m 突堤案における再現実験結果 (平常波浪時:  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$  の流れ場)



図一 3. 22 150m 突堤案における再現実験結果 (汀線変化)



図一 3. 23 150m 突堤案における再現実験結果 (地形変化)

地形変化の実験結果を図一 3. 23 に示す。図は、既往調査における数値シミュレーション結果、すなわち「150m 突堤を設置した場合には、南側海浜とともに、北側海浜の養浜砂が安定すること」という再現目標を満足しており、再現性は良好である。

### 3. 5 模型時間縮尺の検討

以上の検討により、予備実験で設定された沖波の歪み度に関する妥当性が確認された。しかしながら、基本計画案では、造波 20 時間後において北側海浜の汀線が安定形状に達することはなかった。そこで、基本計画案の再現実験で得られた地形変化速度を数値解析結果と比較することにより、模型の時間縮尺を推定し、海浜安定実験において人工海浜が安定形状に達するための適切な波作用時間を決定した。

#### (1) 短期地形変化に関する時間縮尺の推定

暴風波浪時、すなわち年数回発生するような荒天時波浪における短期的な地形変化に対する模型時間縮尺の推定には、漂砂量公式に基づく地形変化量の数値計算結果 (既往調査、現地 24 時間分の変化予測) と本実験の地形測定結果を用いた。検討結果を図一 3. 24 に示す。図は海浜変形がとくに顕著となる北側海浜に着目して、領域分割図に示すブロックごとの平均水深の変化を求めたものである。図より、ブロック 4 では実験室のほうに変化速度勾配が大きいけれども、侵食量が最も大きいブロック 5 と堆積量が最も大きいブロック 3 では変化速度勾配はほぼ等しくなり、現地の波作用 24 時間は、模型での波作用 8 時間に相当することがわかった。

#### (2) 長期地形変化に関する時間縮尺の推定

様々な波浪の作用を受けて形成される長期的な海浜変形に対する模型時間縮尺の推定には、1-line モデルに基づく汀線変化の解析結果 (既往調査、現地 1 年分の変化予測) および本実験の汀線測定結果を用いた。検討結果を図一 3. 25 に示す。この図は、海浜変形がとくに顕著となる北側海浜において、模型実験により汀線の後退量が最大となった沿岸方向距離 1350cm 地点 (北側海浜中央から北より) の汀線変化量に着目したものである。一方、平成 5 年度における地形変化予測解析では、この測線は  $X=800\text{m}$  に対応するので、図には  $X=800$  地点の汀線変化量を時間経過ごとにプロットしている。図より、現地および実験室における汀線の変化速度を等しくすると、実験室における波作用 20 時間後の汀線変化量は、現地の 6 ヶ月後の汀線変化量に対応することがわかった。したがって、現地の波作用 1 年間は、模型での波作用 40 時間に相当することがわかった。

以上の検討より得られた本実験の時間縮尺を表-3.4にまとめる。

表-3.4 本実験の時間縮尺

模型量	現地量
平常波浪 10 時間 + 暴風波浪 10 時間	平常波浪 6 ヶ月間 (年数回の暴風波浪を含む)
暴風波浪 10 時間	暴風波浪約 24 時間

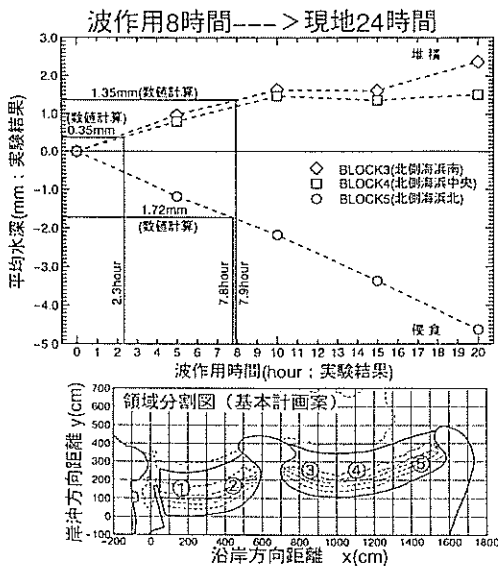


図-3.24 暴風波浪時における時間縮尺の検討

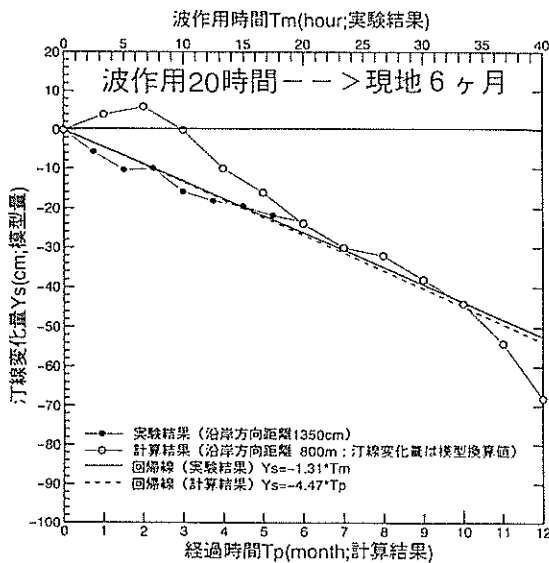


図-3.25 平常波浪時と暴風波浪時を通じた時間縮尺

#### 4. 海浜安定工法に関する実験結果

##### 4.1 島状ヘッドランド案の選定

既往調査における数値シミュレーションにより 150m 突堤案は海浜の安定を確保する有効な案であることが確認された。しかしながら、その後の情勢の変化により、漁業補償の問題および周辺の自然環境、景観への配慮等から実施が難しくなった。そこで本実験では、島堤状の構造物として、島状ヘッドランド案の海浜安定化に対する効果を検討した。ヘッドランドは、通常、汀線に接した構造物として定義され、沖合いの構造物は離岸堤として定義されるが、ここでは、汀線から沖合いまで、最適な位置に設置される島状の海浜安定構造物として島状ヘッドランドを定義した。

島状ヘッドランド案では、島堤状の比較的小規模な構造物が汀線近傍の浅海域に複数配置されるため、それらによって構成される人工海浜の形状は複雑になる傾向がある。既往調査における数値シミュレーションでは、このような条件において信頼し得る計算結果を得ることが難しく、また、最近さかんに開発されているビジネス方程式を用いた漂砂予測モデル (例えば, Hiraishi ら, 2000) においては、現地に対する適用例が少なく、モデルの再現精度の検証が未だ不十分である。したがって、ここでは移動床模型による検討が必要であると考えられる。

模型実験においては、自然石と同様な水理条件 (空隙・透過性等) を有する砕石を用いて、いくつかの島状ヘッドランドを整形し、海浜安定化効果を得る最適な配置条件を試行錯誤的に検討した。

波作用時間	0      2.5      5.0      7.5      10.0h
波浪種類	暴風波浪
波浪諸元	( $H_{1/2}=4.0\text{cm}$ , $T_{1/2}=1.41\text{s}$ )
潮位・波向	(潮位: H.W.L. = D.L. +3.76cm, 波向: NW)
砂面整形	○(粗均し)
汀線測定	○      ○      ○      ○      ●
流況(染料)観察	(波作用中適宜)

※ヘッドランド案4, 6は10時間; その他は5時間の波作用

図-4.1 ヘッドランド案選定実験の手順

(1) 島状ヘッドランド案の抽出

沖波条件を  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  (暴風波浪), 波作用時間を5~10時間として, 北側海浜の汀線測定と染料による流況観察を実施し, 最適なヘッドランド案の選定を行った. 選定実験の手順を図-4.1に示す. また選定実験に用いた島状ヘッドランドの配置案を, 図-4.2(a)~(f)に示す.

ヘッドランド案-1 (図-4.2(a))は, 北側海浜に島状ヘッドランドを2基設置して北側ヘッドランドから海浜中央よりの沿岸漂砂を抑止し, 海浜侵食および汀線後退の軽減を期待する案である. 天端高は後浜高と同じ+3.5mとし, 後浜からの視界を妨げないよう配慮した.

ヘッドランド案-2 (図-4.2(b))は, 北側海浜に島状ヘッドランドを3基設置して, 案-1と同じ海浜安定化効果を期待する案である. 天端高は潮位 H.W.Lと同じ+1.88mとし, 汀線からの視界を妨げず, かつ構造物設置による圧迫感を押さえるよう配慮した.

ヘッドランド案-3 (図-4.2(c))は, 北側海浜の島状ヘッドランドを4基に増やした案である. 島状

ヘッドランドの天端高は案-2と同じ+1.88mである.

ヘッドランド案-4 (図-4.2(d))は, 北側海浜に海岸線に対して平行に島状ヘッドランドを3基設置して海浜安定化を期待する案である. 南向きの漂砂抑止のため, 海浜中央には規模の大きな島状ヘッドランドを配置した. 天端高は後浜高と同じ+3.5mとした.

ヘッドランド案-5 (図-4.2(e))は, 北側海浜の北側の侵食および汀線後退を抑止するために, 北側ヘッドランド先端に島状ヘッドランドを設置するとともに, その背後に小規模なヘッドランドを配置する案である. 海浜中央の島状ヘッドランドは案-4よりも沖出ししている.

ヘッドランド案-6 (図-4.2(f))は, 案-5における島状ヘッドランド間の開口部に島状ヘッドランドを追加配置する案である. 追加された島状ヘッドランドは, 作用する波向きにほぼ直角に配置されており, 入射波の軽減効果のみならず, 変化に富んだ施設配置となり, ヘッドランド上に植栽等を施すことや, ヘッドランド上に休憩所を設けることにより景観の向上が期待される.

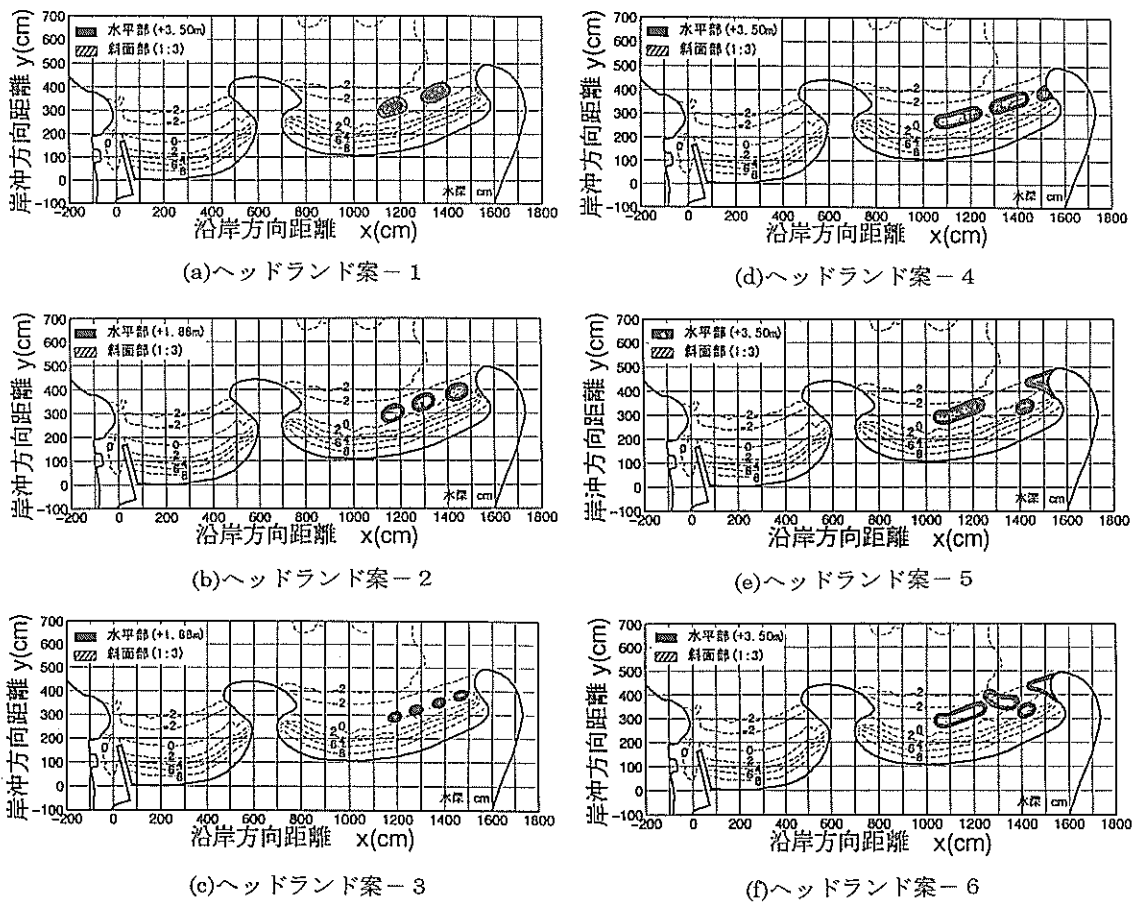


図-4.2 島状ヘッドランドの配置案

(2) 島状ヘッドランド案の選定実験

島状ヘッドランド案-1~6に関する実験結果を図-4. 3~8に、さらに、これらの比較結果を図-4. 9に示す。

ヘッドランド上の越波を許さない島状ヘッドランド案-1および4では、島状ヘッドランド背後におけるトンボロ状の汀線の前進および開口部における汀線の後退がみられ、さらに北側海浜南側では汀線の後退がみられた。

島状ヘッドランド案-2および3は、前浜からの広い視界を確保する効果が期待されたが、越波による海浜侵食がみられた。ヘッドランド案-2では、案-1, 4と同様、島状ヘッドランド背後におけるトンボロ状の汀線前進および開口部における汀線後退がみられ、さらに北側海浜では汀線の後退がみられた。一方ヘッドランド案-3では、トンボロ状の汀線変化の傾向が弱まり、代わりに北よりの島状ヘッドランド背後で汀線後退、南よりの島状ヘッドランド背後で汀線前進がみられた。このとき北側海浜南側の汀線変化はほとんどみられなかった。

島状ヘッドランド案-5および6は、前浜からの広い視野の確保を犠牲にする代わりに、ヘッドランドの形状および配置に変化を持たせ、景観のおもしろさを創造する効果が期待された。ヘッドランド案-5では、開口部

を広くしたため、北側海浜北側の汀線変化が極端に大きくなる傾向がみられた。しかし開口部に島状ヘッドランドを追加したヘッドランド案-6では、図-4. 9より明らかなように、6案の中で汀線変化が最も小さくなった。さらに造波10時間後にはほぼ安定形状に達していることが確認された。また島状ヘッドランド案-6における汀線変化は、基本計画案に比ベ明らかに安定性が向上し、かつ北側海浜北側の一部を除いて150m突堤案とほぼ同様な安定性を有することがわかった。造波5時間後における北側海浜の状況を写真-4. 1に示す。

したがって本実験では、島状ヘッドランド案-6を人工海浜の安定性の確保に最適なヘッドランドの配置条件として選定できる。

なお、島状ヘッドランドは、海浜に入射する波を変形させ背後の波高を減衰させる効果を有し、これが海浜の安定化を図ることになる。ただし、本実験では、フルード則に対して歪んだ沖波諸元を用いており、このことが人工海浜周辺の波浪変形に少なからず影響を与えていると考えなければならない。すなわち、沖波の周期が長く、波高が大きくなっているため、島状ヘッドランドによる波の回折効果が減少し、本実験では、現地に比べて回折係数が大きくなる傾向がある。したがって本実験は、海浜変形に関してやや危険側の値を示すこととなる。つま

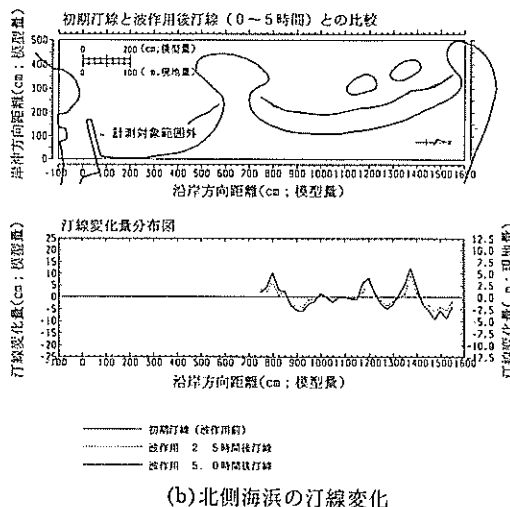
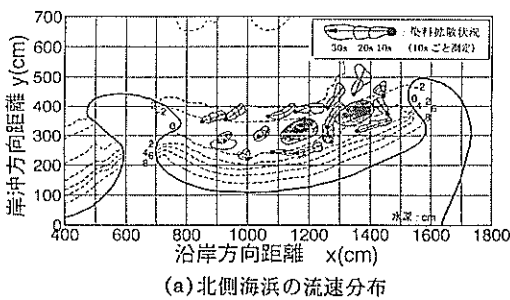


図-4. 3 ヘッドランド案-1 (造波5時間後)

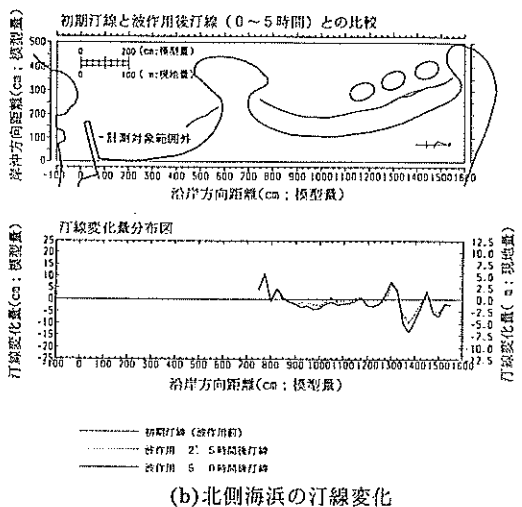
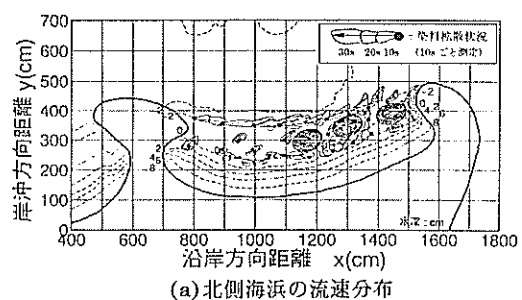
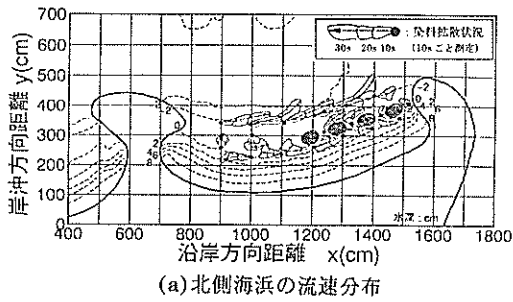
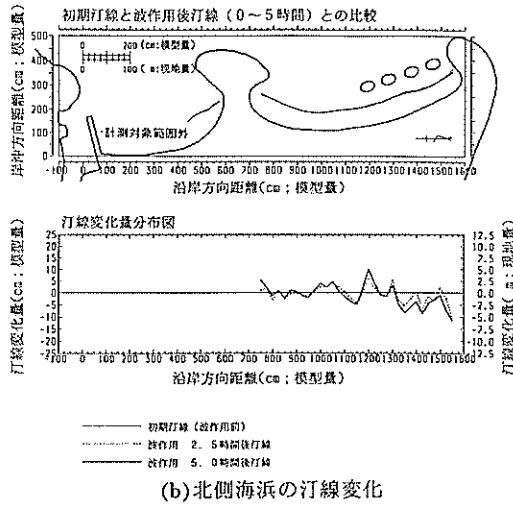


図-4. 4 ヘッドランド案-2 (造波5時間後)



(a) 北側海浜の流速分布

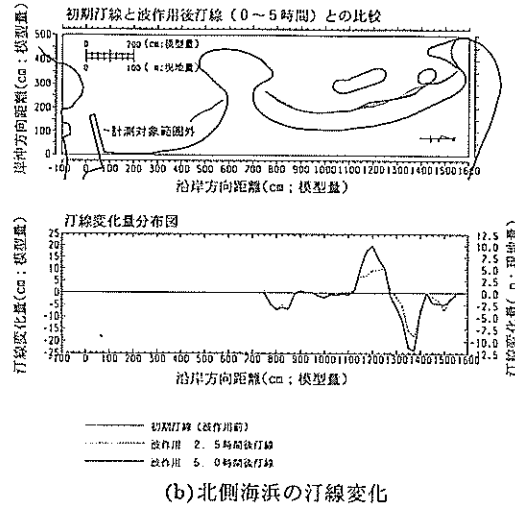


(b) 北側海浜の汀線変化

図-4.5 ヘッドランド案-3 (造波5時間後)

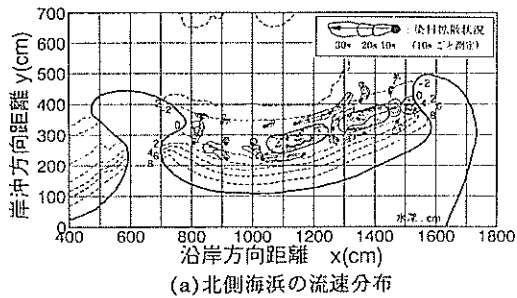
(欠測)

(a) 北側海浜の流速分布

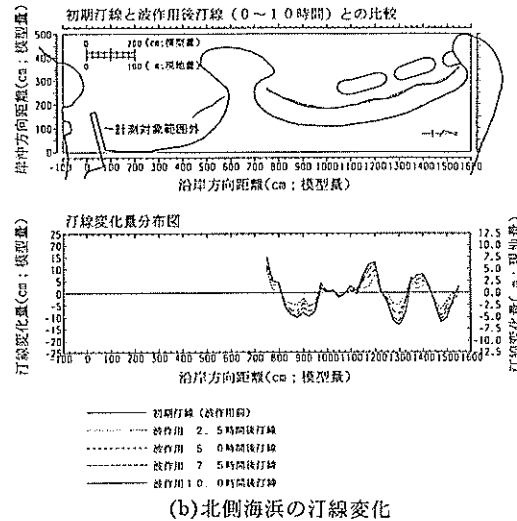


(b) 北側海浜の汀線変化

図-4.7 ヘッドランド案-5 (造波5時間後)

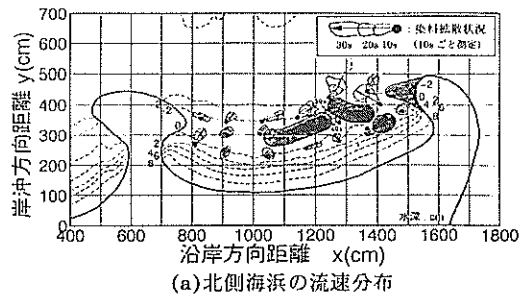


(a) 北側海浜の流速分布

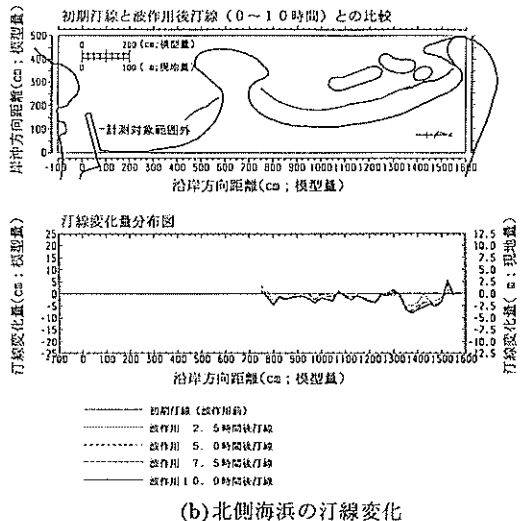


(b) 北側海浜の汀線変化

図-4.6 ヘッドランド案-4 (造波10時間後)



(a) 北側海浜の流速分布



(b) 北側海浜の汀線変化

図-4.8 ヘッドランド案-6 (造波10時間後)

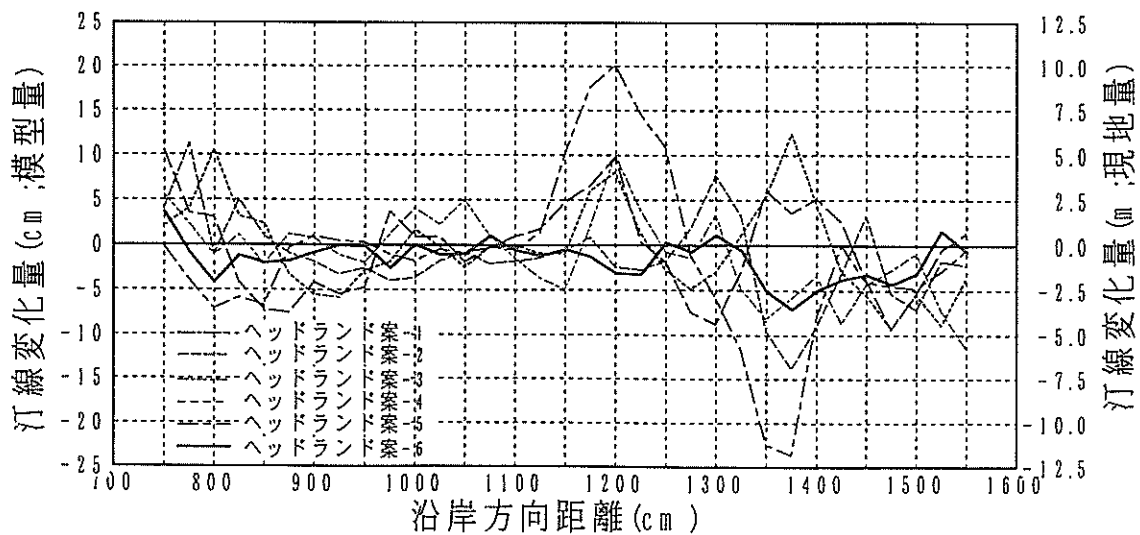


図-4.9 島状ヘッドランド案-1~6 (北側海浜)における汀線変化量の比較 (造波5時間後)

り、沖波の波形勾配を大きくしたことにより、島状ヘッドランドの背後では、危険側の海浜変形予測が得られるため、現地への適用上の問題は生じない。



写真-4.1 海浜の状況(島状ヘッドランド案-6)

#### 4.2 島状ヘッドランド案における海浜安定実験

3.4 再現実験において移動床平面実験に用いた波浪諸元の妥当性を検証し、3.5 模型時間縮尺の検討において現地と実験室との時間縮尺を推定した。そこで本節および次節では、前節で選定された最適な島状ヘッドランド案、およびプレジャーボートの航行のためにその海浜前面を掘削した案について、海浜の安定性を検討する。

海浜安定実験は次のような手順で実施する。再現実験と同様、まず整形された初期地形に対して平常波浪 ( $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ ) を10時間造波した後、暴風波浪 ( $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ ) を10時間造波し、再現実験結果と定量的な比較が可能なデータを取得する。さらに、時間縮尺の検討結果から、長期的な汀線変化予測においては実験の波作用20時間が現地6ヶ月に相当すると推測されることから、現地1年間の海浜変形を予測するために、引き続き平常波浪10時間と暴風波浪10時間の波作用を行い、海浜の安定性を検討する。ここで実験条件は、再現実験と同様、朔望平均満潮位 D.L.+3.76cm (現地 D.L.+1.88m)、波向きをNWとした。

海浜安定実験の手順を図-4.10に示す。

##### (1) 人工海浜周辺の流れ場

人工海浜前面における流況分布のうち、平常波浪時を図-4.11に、暴風波浪時を図-4.12に示す。いずれの波浪条件においても北側海浜では、島状ヘッドランド背後の流れは弱く、また島状ヘッドランド開口部から沖に向かう流れもほとんど観察されない。さらに基本計画案でみられたような顕著な沿岸流の形成はみられない。ただし島状ヘッドランドによる波遮蔽域より南側では、島状ヘッドランド背後に比べ若干速い流れがみられる。一方、南側海浜では、基本計画案、150m突堤案と同様、顕著な沿岸流はみられない。





平常波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ , 波向 NW) +  
 暴風波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ , 波向 NW) +  
 平常波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ , 波向 NW) +  
 暴風波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ , 波向 NW)

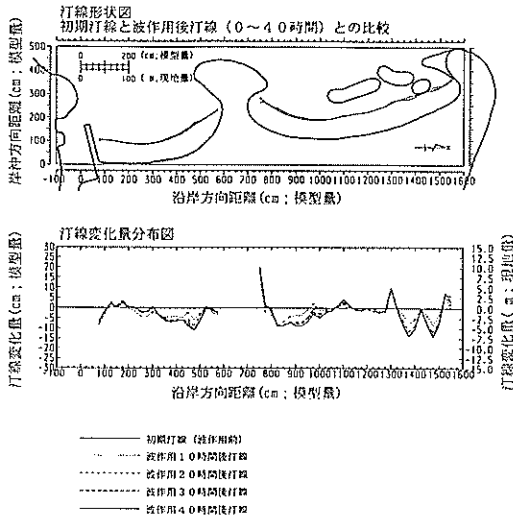


図-4. 13 島状ヘッドランド案の海浜安定実験  
 (汀線変化, 造波 0~40 時間後)

平常波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ , 波向 NW) +  
 暴風波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ , 波向 NW)

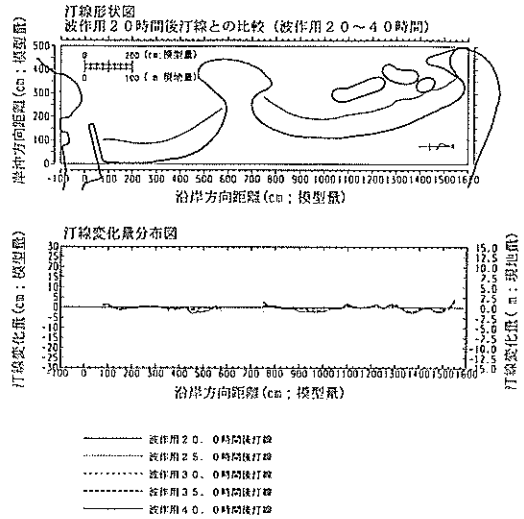


図-4. 14 島状ヘッドランド案の海浜安定実験  
 (汀線変化, 造波 20~40 時間後)

平常波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ , 波向 NW) +  
 暴風波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ , 波向 NW) +  
 平常波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ , 波向 NW) +  
 暴風波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$ , 波向 NW)

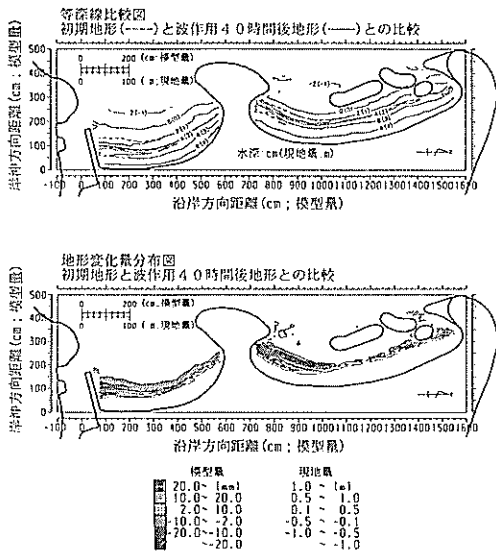


図-4. 15 島状ヘッドランド案の海浜安定実験  
 (地形変化, 造波 0~40 時間後)

平常波浪 10 時間作用時(不規則波,  $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$ , 波向 NW)

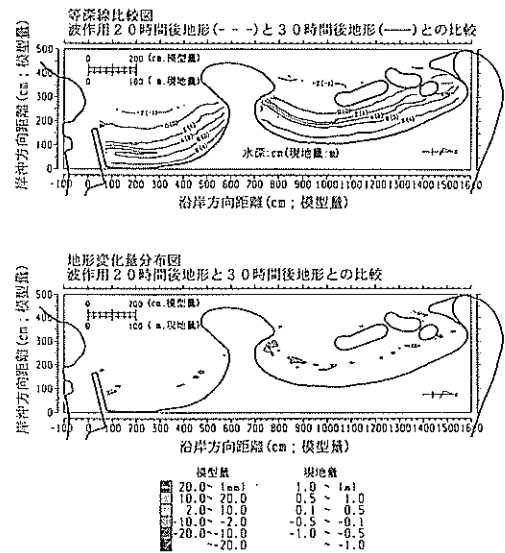


図-4. 16 島状ヘッドランド案の海浜安定実験  
 (地形変化, 造波 20~30 時間後)

## (2) 汀線変化

実験結果のうち、初期汀線、波作用 40 時間後の汀線およびその変化量を図-4. 13 に示す。また波作用 20 時間後から 40 時間後までの汀線変化量を図-4. 14 に示す。

北側海浜では、図-4. 13 より波作用時間の経過とともに島状ヘッドランド背後で小規模なトンボロが形成されることがわかる。一方島状ヘッドランドによる波遮蔽域より南側では汀線が後退し、中央ヘッドランド基部で汀線が前進することから、南向きの漂砂移動が生じているものと考えられる。しかしながら図-4. 14 をみると、波作用 20 時間後から波作用 40 時間後（現地 6 ヶ月後から 1 年後）までの間における汀線変化はわずかであり、汀線形状はほぼ定常に達しているものと判断される。

南側海浜では、図-4. 13 より基本計画案および 150m 突堤案と同様、全体的にほとんど汀線変化を生じないことがわかる。また図-4. 14 より造波開始 20 時間後には定常に達していると判断される。

以上のことから、本実験で提案した島状ヘッドランド案における汀線変化の傾向をまとめると次のようである。

島状ヘッドランド案は、150m 突堤案と比較すると初期の汀線変化量は大きいですが、波作用 20 時間後（現地 6 ヶ月後）には定常に達し、その後は 150m 突堤案と同様な海浜安定効果が期待される。したがって、初期の養浜形状を適切に設定することで、安定な海浜を造成することが可能であると考えられる。

## (3) 地形変化

実験結果のうち、初期地形、波作用 40 時間後の地形およびその変化量を図-4. 15 に示す。また波作用 20 時間後から 30 時間後までの地形変化量を図-4. 16 に示す。

北側海浜では、図-4. 15 より前浜のバームおよび島状ヘッドランド背後のトンボロの形成に伴う地形変化を除けば地形変化はわずかであり、養浜砂の安定がほぼ確保されていることがわかる。一方島状ヘッドランドによる波遮蔽域より南側では、汀線付近の堆積域およびその沖側の侵食域が広く分布していることから、この水域では岸沖漂砂が卓越していることがわかる。これは、島状ヘッドランドが沿岸漂砂に対して有効な構造物であり、入射波の波形勾配が大きく影響する岸沖漂砂に対する抑止効果は望めないためであると考えられる。

また中央ヘッドランド基部での堆積量が大きいことから、岸沖漂砂に加えて南向きの漂砂移動が生じているものと考えられる。しかしながら図-4. 16 をみるか

ぎり、この期間における地形変化はわずかであることから、海浜断面がほぼ定常に達し、それに伴う沿岸漂砂が収束したために、海岸地形がほぼ定常に達したものと判断される。

南側海浜では、図-4. 15 より基本計画案および 150m 突堤案と同様、汀線背後の前浜におけるバームおよびその沖側における侵食域の形成を除けば、全体的にほとんど地形変化を生じないことがわかる。また図-4. 16 より造波開始 20 時間後には海浜地形は定常に達していると判断される。

以上のことから、島状ヘッドランド案は、基本計画案において問題となった北側海浜における大規模な侵食域と堆積域の形成を抑制し、150m 突堤案と同程度の海浜安定化効果が期待できる。また南側海浜の安定性は依然として確保される。

## 4. 3 海浜前面掘削案における海浜安定実験

前節では島状ヘッドランド案の海浜安定化効果について検討し、150m 突堤案の代替案として十分な効果を有することを確認した。

一方、当該人工海浜の利用計画では、南側海浜において海浜前面を D.L.-1.0m まで掘削して海水浴利用を図り、北側海浜において海浜前面を D.L.-2.0m まで掘削してプレジャーボートの航行を確保する計画がある。そこで本節では、前節の島状ヘッドランド案においてその前面を図-4. 17 のように掘削した案（海浜前面掘削案）について、海浜の安定性を検討する。

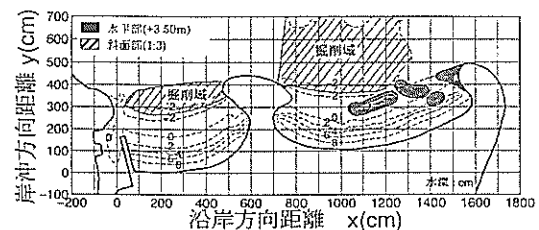


図-4. 17 海浜前面掘削案

### (1) 人工海浜周辺の流れ場

人工海浜前面における流況分布のうち、平常波浪を図-4. 18 に、暴風波浪時を図-4. 19 に示す。いずれの波浪条件においても、北側海浜の島状ヘッドランド背後の流れは島状ヘッドランド案と同様に弱く、また島状ヘッドランド開口部から沖に向かう流れもほとんど観察されない。ただし島状ヘッドランドによる波遮蔽域より南側では、島状ヘッドランド背後に比べ速い流れがみ

られる。またこの流れは島状ヘッドランド案よりも速い。南側海浜では、基本計画案、150m 突堤案および島状ヘッドランド案と同様、顕著な沿岸流はみられない。

(2) 汀線変化

実験結果のうち、初期汀線、波作用 40 時間後の汀線およびその変化量を図-4. 20 に示す。また波作用 20 時間後から 40 時間後までの汀線変化量を図-4. 21 に示す。

北側海浜では、図-4. 20 より島状ヘッドランド案と同様、波作用時間の経過とともに島状ヘッドランド背後で小規模なトンボロが形成されることがわかる。一方、島状ヘッドランドによる波遮蔽域より南側では汀線が後退し、中央ヘッドランド基部で汀線が前進することから、南向きの漂砂移動が生じているものと考えられる。さらに図-4. 21 をみると、波作用 20 時間後から波作用 40 時間後（現地 6 ヶ月後から 1 年後）までの間における汀線変化は、島状ヘッドランド背後ではわずかであるが、それより南側では波作用時間の経過とともに汀線が前進し、波作用 40 時間後においても汀線形状が定常に達していないことがわかる。これは島状ヘッドランドによって入射波が遮蔽されない海浜の南側から、波が砕波せずに海浜に進入し、この海域の岸沖漂砂、さらには沿岸漂砂を助長しているためと考えられる。したがって、これは海浜前面を掘削することにより海浜変形が大きくなることを示す現象であると考えられる。

一方南側海浜では、図-4. 20 より基本計画案、150m 突堤案および島状ヘッドランド案と同様、全体的

にほとんど汀線変化を生じないことがわかる。また図-4. 21 より造波開始 20 時間後には定常に達していると判断される。

以上のことから、海浜前面掘削案における汀線変化の傾向をまとめると次のようである。

海浜前面掘削案は、島状ヘッドランド背後では島状ヘッドランド案と同様、初期の汀線変化量は大きいものの、波作用 20 時間後（現地 6 ヶ月後）には定常に達するが、それより南側の前面にヘッドランドがない海域では、海浜前面を掘削したことにより島状ヘッドランド案よりも大きな波が海浜に進入するようになり、養浜砂の安定を確保することが難しくなるようである。

(3) 地形変化

実験結果のうち、初期地形、波作用 40 時間後の地形およびその変化量を図-4. 22 に示す。また波作用 20 時間後から 30 時間後までの地形変化量を図-4. 23 に示す。

島状ヘッドランド案と比較すると、北側海浜では、図-4. 22 より島状ヘッドランドによる波遮蔽域より南側の水域では、汀線付近の堆積域およびその沖側の侵食域が大きく拡大しており、また地形変化量も増大していることがわかる。これは海浜前面を掘削したことによりこの水域における来襲波が大きくなっているためと考えられる。またこの水域においては図-4. 23 においても侵食域と堆積域が広範囲に分布しており、少なくとも波作用 30 時間後において定常に達していないことがわかる。なお沖側の侵食域では、基本計画案においても

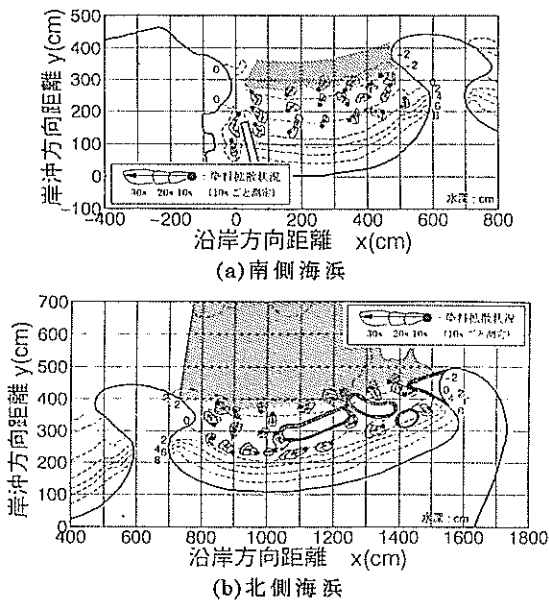


図-4. 18 海浜前面掘削案の海浜安定実験結果  
(平常波浪時： $H_{1/3}=3.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.27\text{s}$  の流れ場)

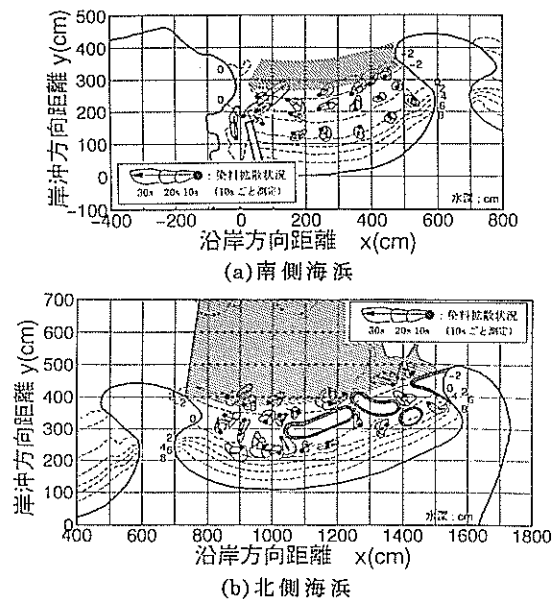


図-4. 19 海浜前面掘削案の海浜安定実験結果  
(暴風波浪時： $H_{1/3}=4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.41\text{s}$  の流れ場)

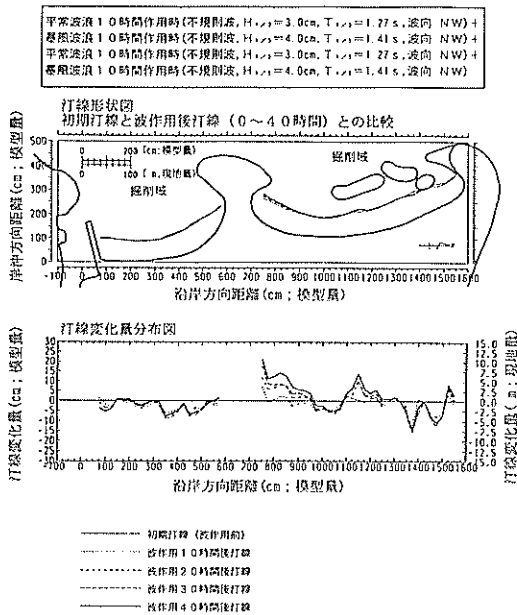


図-4. 20 海浜前面掘削案の海浜安定実験結果  
(汀線変化, 造波 0~40 時間後)

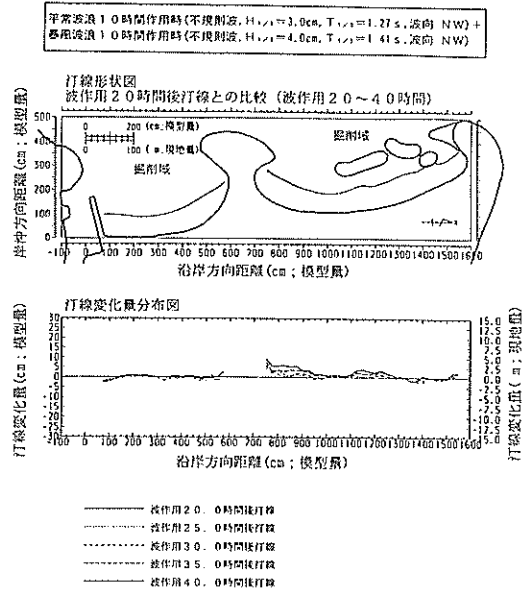


図-4. 21 海浜前面掘削案の海浜安定実験結果  
(汀線変化, 造波 20~40 時間後)

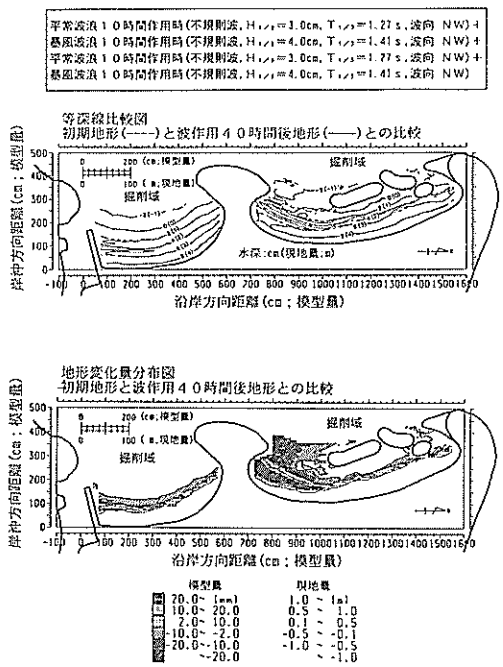


図-4. 22 海浜前面掘削案の海浜安定実験結果  
(地形変化, 造波 0~40 時間後)

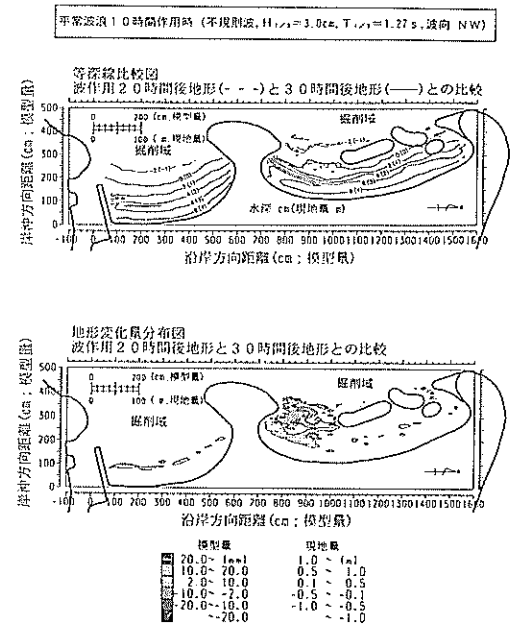


図-4. 23 海浜前面掘削案の海浜安定実験結果  
(地形変化, 造波 20~30 時間後)

観察されなかった砂れんがみられるようになり、そのことから海浜を掘削しない場合に比べて海浜に作用する波浪が大きかったものと推測される。さらに島状ヘッドランド背後でも南よりのヘッドランド背後で地形変化量が大きくなっており、海浜前面掘削の影響がみられる。

南側海浜では、図-4.22より基本計画案、150m突堤案および島状ヘッドランド案と同様、汀線背後の前浜におけるバームおよびその沖側における侵食域の形成を除けば、全体的にほとんど地形変化を生じないことがわかる。また図-4.23より造波開始20時間後には海浜地形は定常に達していると判断されることから、海浜前面を掘削した影響はないと考えられる。

以上のことから、海浜前面掘削案における地形変化の傾向をまとめると次のようである。

海浜前面掘削案は、島状ヘッドランド案に比べて、北側海浜では島状ヘッドランドが存在しない水域における侵食域が沖に大きく拡大し、かつ中央ヘッドランド基部の堆積が極めて大きくなることから、海浜の安定性を保つ上で海浜前面を掘削することは非常に不利であると考えられる。一方、南側海浜では海浜の安定性に関して海浜前面を掘削する影響は非常に軽微である。したがって、北側海浜前面の掘削は、海浜の安定上望ましくないと考えられる。

#### 4.4 人工海浜の安定性評価

ここでは平面移動床実験のまとめとして、人工海浜の汀線変化、地形変化、および断面変化に着目し、海浜施設形状の違いによる人工海浜の安定性について考察する。

##### (1) 汀線変化

計画施設形状ごとの汀線変化を図-4.24に示す。なお図中汀線の変化量は初期地形の均し精度の影響を除外するため、波作用2.5時間後から波作用20時間後までの変化量として定義している。

南側海浜では、地形・断面変化と同様相対的な変化量は小さく、かつ施設条件や水深条件の違いによる差異も認められず、安定な海浜形状が形成されているものと判断される。

一方北側海浜では、施設形状および水深条件により形成される海浜形状は大きく異なる。基本計画案では海浜北側の汀線後退と海浜中央から南側の汀線前進が極めて大きく、海浜形状の維持が困難であることを示している。150m突堤案および島状ヘッドランド案では局所的な汀線変化を除けば両者はほぼ同程度の汀線変化にとどまり、ともに海浜形状の維持が期待できる。しかしながら島状ヘッドランド案の海浜前面を掘削した海浜前面掘削案で

は、基本計画案ほどの汀線変化は生じないが、前面に島状ヘッドランドが存在しない海浜南側では掘削しない場合に比べて汀線前進が激しく波作用40時間後においても定常に達しなかったことから、海浜形状の維持は困難であると考えられる。

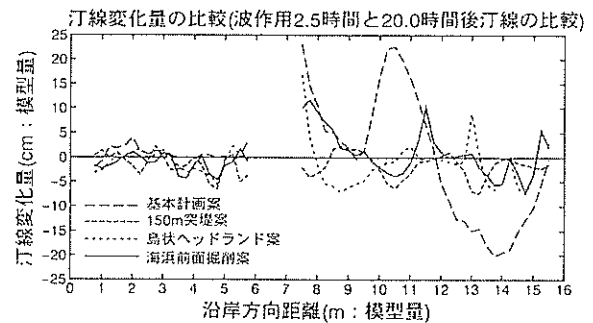


図-4.24 計画施設形状ごとの汀線変化の比較

##### (2) 地形変化

南側海浜では、いずれの計画施設形状においても、汀線付近にバームおよびその沖側に侵食域を形成する堆積型の地形変化を示し、養浜砂は安定している。この傾向は、さらに海浜前面を掘削した水深条件でも同様であった。また南側海浜周辺における流況分布についても施設形状による大きな差異は観察されなかった。

一方、北側海浜では、海浜に斜めに入射する波により南向きの沿岸漂砂が卓越し、海浜の北側で侵食域を、南側で堆積域を形成することが予測されたため、南向きの沿岸漂砂を抑止する対策工を講じる必要があると判断された。そこで既往調査の数値シミュレーションにおいて効果が期待された150m突堤案により模型実験を実施したところ、数値シミュレーション同様、南向きの沿岸漂砂が抑止され、南側海浜とともに北側海浜の養浜砂が安定することが確認された。さらに、情勢の変化から現実的に建設が困難となった150m突堤案の代替案として、本実験で提案した島状ヘッドランド案（4基の島状ヘッドランドから構成される施設配置）について実施した海浜安定実験により、島状ヘッドランド背後の養浜砂の安定が確保されるとともに、オープンな水域となる北側海浜の南側でも150m突堤案と同程度の海浜安定化効果が期待できることがわかった。なお150m突堤案および島状ヘッドランド案ではともに、南向きの沿岸漂砂を促す沿岸流は形成されることが観察された。ただし、北側海浜前面を掘削した場合には、南向きの沿岸流の形成は認められないものの、海浜に作用する波浪が大きくなるために、オープンな水域となる海浜の南側で侵食域および堆積域の拡大がみられた。よって北側海浜の前面掘削

はあまり望ましくないとされる。

(3) 断面変化

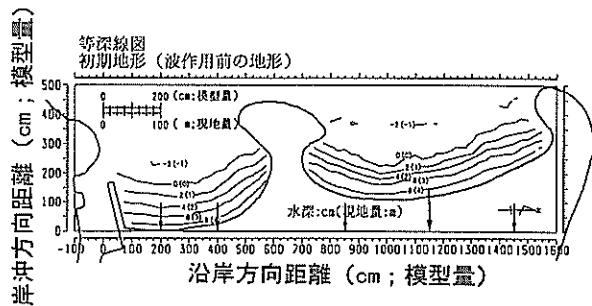
人工海浜の代表岸沖断面における計画施設形状ごとの断面変化を図-4. 25に示す。

南側海浜に相当する沿岸方向距離200cmと400cmでは、計画施設形状による差異は小さく、断面変化量および地形変化領域はほとんど一致している。これは、さらに海浜前面を掘削した水深条件でも同様であった。

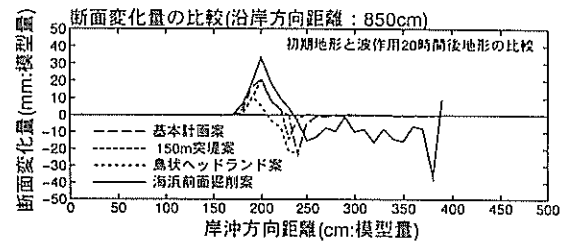
一方、北側海浜に相当する沿岸方向距離850cm, 1150cm, 1450cmでは、計画施設形状により大きな差異がみられる。沿岸方向距離850cmでは、基本計画案や150m突堤案に比べて、島状ヘッドランド案における汀線付近のバーム規模がやや小さく、その沖側の侵食量が大きくなっている。さらに海浜前面掘削案では断面変化量が極めて大きくなり、移動限界水深が沖に移動していることがわかる。これは海浜前面を掘削したことにより、沖側のリーフ地形による消波機能が減少したためである

と考えられる。沿岸方向距離1150cmでは、基本計画案および海浜前面掘削案における断面変化量が他より大きくなっている。沿岸方向距離1450cmでは、基本計画案において他の施設形状に比べ大きな断面変化を示し、顕著な侵食地形を形成していることがわかる。これは基本計画案の北側海浜に形成される沿岸漂砂に起因するものである。

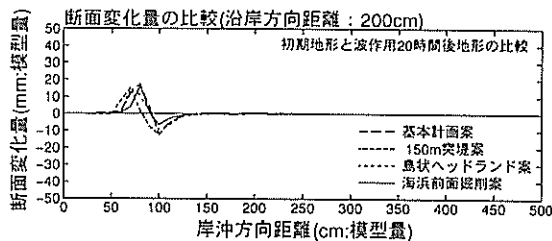
ただし海浜断面の形状は、一般に岸沖漂砂によって決定されるため、波の回折による波高減衰効果や沿岸漂砂の抑制効果を期待した150m突堤案や島状ヘッドランド案において、海浜断面の変化を抑制する効果を過度に期待すること避けなければならない。また岸沖漂砂は、海浜に入射する波の波形勾配に大きく影響されるため、沿岸漂砂を相似するために沖波の波形勾配を歪ませた本実験では、現地における現象とはやや異なる結果となっている可能性がある。



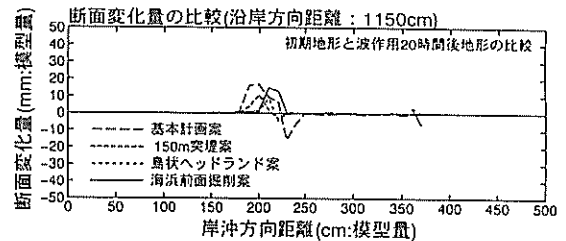
(a) 代表断面の位置



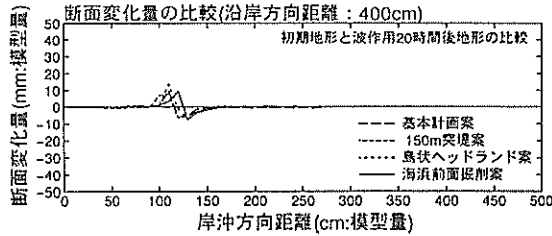
(d) 沿岸方向距離 ; 850cm



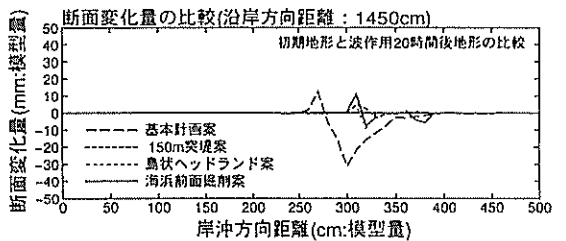
(b) 沿岸方向距離 ; 200cm



(e) 沿岸方向距離 ; 1150cm



(c) 沿岸方向距離 ; 400cm



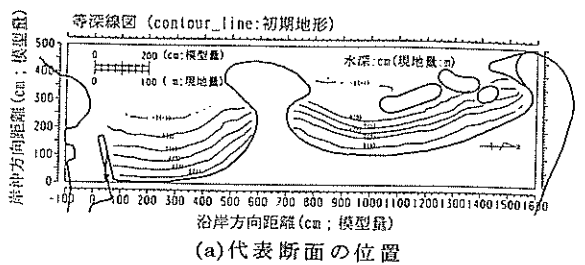
(f) 沿岸方向距離 ; 1450cm

図-4. 25 計画施設形状ごとの代表断面における断面変化の比較

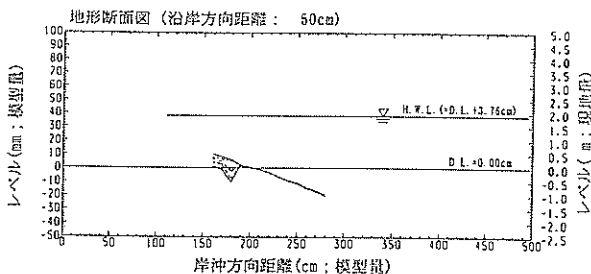
#### 4. 5 離岸堤背後の航路埋没に関する危険性評価

南側海浜建設予定地内の既存船着き場の機能を維持するために、既往調査実施後において海浜形状の変更が行われ、同時に航路を確保することが必要となった。そこで養浜砂による航路埋没の危険性および対策工の必要性について検討を行う。

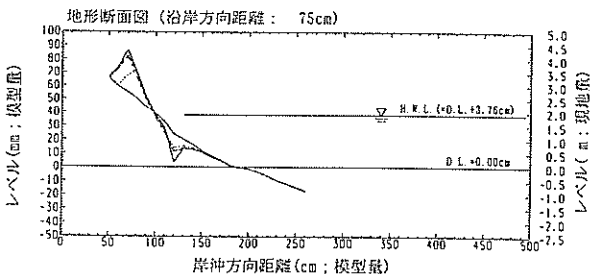
前節においてまとめられたように、既存船着き場の航路維持を必要とする南側海浜では、北側海浜に設置される施設条件および両海浜の前面掘削の有無によることなく養浜砂の安定が期待されると判断された。したがってここでは代表として島状ヘッドランド案を取り上げ、既存船着き場に付帯された突堤（人工海浜建設以前は離岸堤）付近の流況分布および地形断面変化を検討する。突堤付近の流況分布は先述の図-4. 11および図-4. 12を、地形断面図は次の図-4. 26（沿岸方向距離50cm および75cm）を参照されたい。なお、船着き場、航路および突堤の位置については、あとで示す図-4. 27を参照されたい。検討結果を以下に示す。



(a) 代表断面の位置



(b) 沿岸方向距離 ; 50cm



(c) 沿岸方向距離 ; 75cm

図-4. 26 航路突堤付近の海浜断面変化

- ① 突堤付近の流況分布からは南側海浜から突堤背後へ回り込むような流れは観察されておらず、また現地における養浜砂の粒径が 0.7mm と比較的大きいことを考慮すると、養浜砂が浮遊砂となって船着き場前面に堆積することは考えにくい。
- ② 地形断面図より突堤先端付近まで海浜変形が生じることが推測されるが、沿岸方向距離 75cm 地点の断面変化から判断されるように養浜砂は岸向きに移動して汀線付近に堆積し、養浜砂が突堤先端から航路に流出する量はごく僅かである。またこのことは再現実験および海浜安定実験を通して、目視によっても確認されている。
- ③ 本実験は潮位条件として H.W.L. を使用しており、現地においては通常これより低い潮位となるため移動限界水深が沖側へ移動し突堤先端付近の底質移動が大きくなることが予想される。しかしながら当該人工海浜においては、潮位が低いほど海浜前面のリーフ地形による波浪減衰効果が大きくなるため、養浜砂の安定性はむしろ向上するものと思われる。
- ④ 本実験では入射波の波向き条件を NW に限って実施しているが、ともに現地で作用する S 系の波が当該人工海浜に入射した場合には、南側ヘッドランドの遮蔽域にあたる船着き場に付帯された突堤先端では南向きの漂砂が生じることが懸念される。
- ⑤ 本実験では平面模型において既存船着き場奥の水路は再現されていない。したがって既存船着き場および突堤付近において、この水路より流出する流れと波による流れの干渉現象は考慮されておらず、このことが航路周辺の漂砂移動に及ぼす影響については未知である。また水路により上流から運搬される養浜砂以外の土砂の挙動について本実験では対象外である。

以上の検討より、既存船着き場における航路埋没の危険性は低く、航路埋没に関する対策工は要しないものと判断される。しかしながら④、⑤など本実験において考慮外の外力が作用した場合には、養浜砂の流出あるいは航路埋没の可能性は捨て切れない。そのため養浜後は海浜のモニタリングを実施することが重要であり、航路への漂砂が著しい場合には小規模な砂止め堤などの構造物を設置することを検討することが望ましいと思われる。

#### 4. 6 最適工法の提案

前節まで示した実験結果や検討結果を総合的に評価し、150m 突堤案の代替となる人工海浜の外郭施設の条件として 4 基のヘッドランドから成る図-4. 27 に示す島

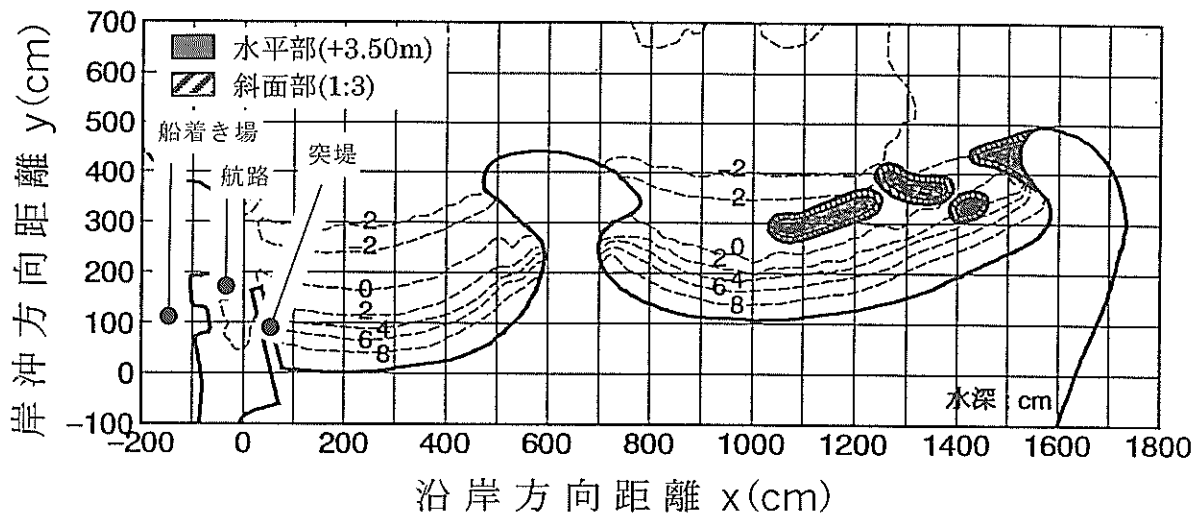


図-4. 27 島状ヘッドランドを用いた最適工法の提案

状ヘッドランド案を最適工法として提案する。ただし、現地適用に際しては以下に述べる事項を踏まえる必要がある。

- ① 海浜前面掘削に対する検討
- ② 景観への配慮
- ③ 追跡調査

(1) 海浜前面掘削に対する検討

トゥリパー地区人工海浜では、南側海浜では海浜前面をD.L.-1.0m掘削して海水浴利用を図るとともに、北側海浜ではD.L.-2.0mまで掘削してプレジャーボートの航行を確保するなどの海浜利用計画がなされている。養浜砂の安定確保の観点からは、南側海浜前面の掘削の影響は小さいと考えられるが、北側海浜については海浜安定の確保が困難なため、海浜前面を掘削することは得策でないとの結果が得られた。したがって、プレジャーボートの利用水域の見直しを行う、あるいは島状ヘッドランド前面についてのみ掘削するなど、利用計画や掘削域について再検討することが望ましい。

(2) 利用性や景観への配慮

当該人工海浜は、天然のリーフに囲まれた優れた自然環境のなかに新たに海浜が造成されるものであり、水辺の環境や景観面、親水性に配慮した構造物を建設することが求められる。このような自然環境との調和を図るには、島状ヘッドランドを自然石で造成したり、ヘッドランド上に植栽を施すことが望ましい。

(3) 追跡調査

本実験では海浜に作用する主たる外力のみを考慮し、また実験の特性上、岸沖漂砂の影響は厳密に評価できて

いない。したがって、とくに人工海浜の断面変化は、実験結果と若干異なることも考えられる。また南側海浜の船着き場における航路については、本実験では考慮しなかったSW方向から来襲する波浪の影響の程度によっては、養浜砂の流入による埋没の危険も否めない。したがって、人工海浜の造成中・造成後の維持・管理に際しては、表-4. 1に示すような追跡調査を実施することが重要である。

表-4. 1 追跡調査の項目

①地形・汀線測量
②底質調査(粒度分布・比重等)
③外力調査(波浪・流況)
④養浜砂の流出状況(航路含む)
⑤飛砂調査

5. 結論

島状ヘッドランドによって構成される当該人工海浜の海浜形成過程においては、波の屈折および回折、さらには複雑なリーフ地形による波浪の変形過程が重要となるので、歪み模型を用いることはできない。また移動床実験における相似則が確立していないので、海底地形や構造物の諸元に対しては無歪みのフルードの相似則を適用し、現地の漂砂動向を再現する波の歪み率を試行錯誤的に検討する必要がある。また現地では人工海浜が建設途中のため、本実験では再現目標とする現地観測データが



存在しない。そこで本実験では、既往調査における基本計画案、150m突堤案に関する人工海浜周辺の流速分布および地形・汀線変化の数値解析結果を再現事象として設定し再現実験を進めた。さらに既往調査において海浜の安定化に有効と推測された150m突堤案が情勢の変化により施工することが困難となったため、本実験ではこの代替案として島状ヘッドランド案を提案し、海浜の安定に必要な施設配置条件を検討した。

本実験より得られた主要な結果を以下に示す。

- ① 現地海域における異常波浪時の沖波条件は有義波高1.15m、有義波周期8.0sであり、朔望平均満潮位は+1.88mであるから、フルードの相似則に従うと、それぞれ2.3cm、1.13sおよび+3.76cmとなる。本実験では長時間造波に伴う平均水位・流れの特性を検定したうえで、流れや地形変化の再現性を詳細に検討した結果、暴風（異常）波浪時の沖波条件として有義波高4.0cm、有義波周期1.41sを得た。また平常波浪の沖波条件は、暴風波浪時の沖波のひずみ度から、有義波高3.0cm、有義波周期1.27sと決定した。
- ② 基本計画案における再現実験結果から、北側海浜では海浜北側で侵食量が大きくかつ侵食域が広くなり、汀線の後退量も波作用時間の経過とともに大きくなった。また北側海浜中央で堆積量が大きく、汀線が前進していることから、南向きの沿岸漂砂が卓越することが確認された。南側海浜では地形・汀線変化量が小さく、養浜砂の安定性が確保されていることが確認された。
- ③ 150m突堤案における再現実験結果から、北側海浜では150m突堤の波遮蔽効果により、基本計画案において海浜北側で生じた広域侵食および汀線後退がみられなかった。これは150m突堤を設置することによって南向きの沿岸漂砂が抑止され、その結果北側海浜の安定性が向上したためであると考えられる。
- ④ 基本計画案および150m突堤案での再現実験結果は、目標とした再現事象と定性的に同様な変化を示しており、再現性は良好であった。したがって再現実験に用いた波浪条件を最適な施設配置を選定するために実施する海浜安定実験に適用した。
- ⑤ 現地と実験室の時間縮尺について検討した結果、年数回発生するような荒天時波浪が現地に24時間作用したときの海浜変形は、実験室の波作用時間8時間分に相当すると判断された。同様に、様々な波浪の作用を受けて形成される長期的な海浜（汀線）変化の観点からは、実験の波作用20時間分の変化が現地の6ヶ月分の変化に対応すると予測された。
- ⑥ 既往調査の汀線変化予測（1-Lineモデル）によると、現地で北側海浜の砂浜が消失する要する時間はほぼ1年間である。したがって再現実験により決定された時間縮尺より、実験室においては40時間の波作用を要すると解釈される。したがって海浜安定実験における波作用時間は平常波浪20時間、暴風波浪20時間の合計40時間とした。
- ⑦ 南側海浜の既存船着き場の航路付近では、再現実験および海浜安定実験を通して、いずれの施設配置においても養浜砂による航路埋没の危険性はみられなかった。ただし、考慮外の波向き（SW方向）に対する危険性についてはなお不明であるため、追跡調査を実施することが望ましい。
- ⑧ 4基のヘッドランドからなる島状ヘッドランド案について海浜安定実験を実施した結果、北側海浜では基本計画案でみられたような海浜北側の大規模な侵食や汀線後退を生じず、海浜の安定が確保されることがわかった。また150m突堤案と比較すると、北側海浜では海浜中央から北側の地形・汀線変化量が軽減され、かつ海浜中央から南側の変化量に大きな差異がみられないことから、150m突堤案と同程度の海浜安定化効果が期待できるものと判断された。
- ⑨ 島状ヘッドランドを配置した海浜前面掘削案では、前面を掘削しない場合に比べて、南側海浜では地形・汀線変化に大きな違いはみられないが、北側海浜では海浜中央から南側における地形・汀線変化量が極めて大きくなり、地形変化を生じる領域も沖に広がることがわかった。この変化に起因し、海浜中央ヘッドランド背後でもトンボロ状の地形が発達し、影響がヘッドランド背後に及ぶことがわかった。沖波条件を歪ませた本実験では、岸沖漂砂に起因する海浜の断面変化を詳細に検討することは難しいが、少なくとも海浜前面を掘削することにより海浜に作用する波浪が増大し、海浜変形が大きくなることが明らかとなった。したがって、安定海浜形成のためには北側海浜前面の掘削について再検討することが望ましい。
- ⑩ 4基のヘッドランドからなる島状ヘッドランド案は、既往調査で海浜安定化に有効とされた150m突堤案と同程度の海浜安定化効果を得られることが確認された。したがって本実験では、本案を養浜砂の安定を確保する最適な施設配置形状として選定した。
- ⑪ 沿岸漂砂を相似させるために沖波の波形勾配を歪ませた本実験では、岸沖漂砂に起因する海浜断面の変化を厳密に予測することが難しいため、海浜の維持・管

理に際しては、追跡調査を実施することが望ましい。

(1999年9月29日受付)

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、沖縄開発庁沖縄総合事務局からは既往調査に関する様々な資料を提供していただきました。また、実験の実施には、株式会社エコーの永松宏一氏、藤本和利氏の献身的なご尽力を賜りました。さらに、本資料をまとめるにあたっては、加藤一正水工部長をはじめ、多くの方々から貴重な助言を賜りました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 入江功・加藤一正・栗山喜昭・村上裕幸・田中則男 (1986) : 人工海浜における地形特性について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.297~301.
- 2) 岩垣雄一 (1987) : 最新海岸工学, 森北出版, pp.146~166.
- 3) 沖縄総合事務局平良港工事事務所・株式会社エコー (1993) : 平良港トゥリバー地区人工海浜安定工法に関する水理模型実験., p.223.
- 4) 小笹博昭・A. H. Brampton (1979) : 護岸のある海浜のてい線変形数値計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 18, No. 4., pp.77~104.
- 5) 木本照智・浅地敦馬・永松宏一・梅原敏明 (1995) : 伏木富山港人工海浜の海浜変形予測 (1) -海浜変形の相似性, とくに底質の選定-, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.636~640.
- 6) 合田良實 (1973) : 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 12, No. 3, pp.31~69.
- 7) 合田良實・鈴木康正・蜂須賀和吉 (1977) : 不規則波を用いた港内静穏度解析, 港湾技研資料, No. 271., p.53.
- 8) 佐藤昭二・田中則男 (1962) : 水平床における波による砂移動について, 第9回海岸工学講演会講演集, pp.95~100.
- 9) 佐藤昭二・寺尾健・田中則男 (1980) : 人工海浜の建設, 土木学会誌, pp.9~17.
- 10) (社)日本港湾協会 (1991) : 面的な海岸防護方式の計画・設計マニュアル, 運輸省港湾局監修, p.84.
- 11) (社)日本マリナー・ビーチ協会 (1992) : ビーチ計画・設計マニュアル, 運輸省港湾局監修, pp.39~90.
- 12) 首藤伸夫 (1974) : 非線形長波の変形-水路幅, 水深の変化する場合-, 第21回海岸工学講演会論文集, pp.57~63.
- 13) 土屋義人・伊藤政博 (1981) : 海浜変形の相似則に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.315~319.
- 14) 平山克也・丸山晴広・平石哲也 (1999) : 珊瑚礁リーフ海域における人工海浜の安定化に関する検討, 海洋開発論文集, Vol. 15, pp.499~504.
- 15) 平山克也・丸山晴広・平石哲也 (1998) : リーフ海岸の養浜砂の移動に関する基礎的な水理実験, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp.191~196.
- 16) 柳嶋慎一・加藤一正・榊原芳昭 (1990) : 経験的固有関数法を用いた移動床模型実験結果の比較検討-那覇港波之上地区模型実験への適用例-, 港湾技研資料, No. 670., p.69.
- 17) 藪下孝雄・中村俊彦 (1976) : 沖縄国際海洋博覧会における人工海浜の設計と施工, 第23回海岸工学講演会論文集, pp.591~596.
- 18) 渡辺晃 (1981) : 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.285~289.
- 19) Bijker, E. W. (1968) : Littoral drift as function of wave sand current, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.415~435.
- 20) Dean, R. G. (1991) : Equilibrium beach profiles : Characteristics and applications, J. Coastal Research, 7(1), pp.53~84.
- 21) Engelund, F. (1965) : Turbulent energy suspended load, Coastal Eng. Lab., Tech. Univ. of Denmark, Rep. No. 10.
- 22) Hiraishi, T, K. Hirayama, I. Uehara (2000) : Modeling of wave, Nearshore-current and Sediment-transformation around detached-breakwater, Proc. 4th Conf. on Hydrodynamics, LOC (Printing).
- 23) Iwagaki, Y. and H. Noda (1963) : Laboratory study of scale effects in two dimensional beach process, Proc. 8th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.194~210.
- 24) Karlsson, T. (1969) : Refraction of continuous ocean wave spectra, J. Waterways and Harbors

- Division, Proc. ASCE, Vol. 95, pp.437~448.
- 25) Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976) :  
Quantive description of sediment transport by  
waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE,  
pp.1093~1112.
- 26) Nayak, I. V. (1970) : Equilibrium profile of  
model beaches, Hy. Eng. Lab. Tech. Rep.  
HEL-2-25, Univ. of Calofornia, Berkeley.
- 27) Sunamura, T. and Horikawa, K. (1974) :  
Two-dimensional beach transformation due to  
waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE.,  
pp.920~938.
- 28) Wilson, B. W. (1965) : Numerical prediction of  
ocean waves in the North Atlantic for December  
1959, Deutsche Hydr. Zeit., Bd. 18, Ht. 3,  
pp.114~130.

#### 記号表

$\tilde{H}$  : エネルギー平均波の波高

$\tilde{T}$  : エネルギー平均波の周期

$l_r$  : 水平方向の模型縮尺

$h_r$  : 鉛直方向の模型縮尺

$H_{1/3}$  : 有義波高

$T_{1/3}$  : 有義波周期

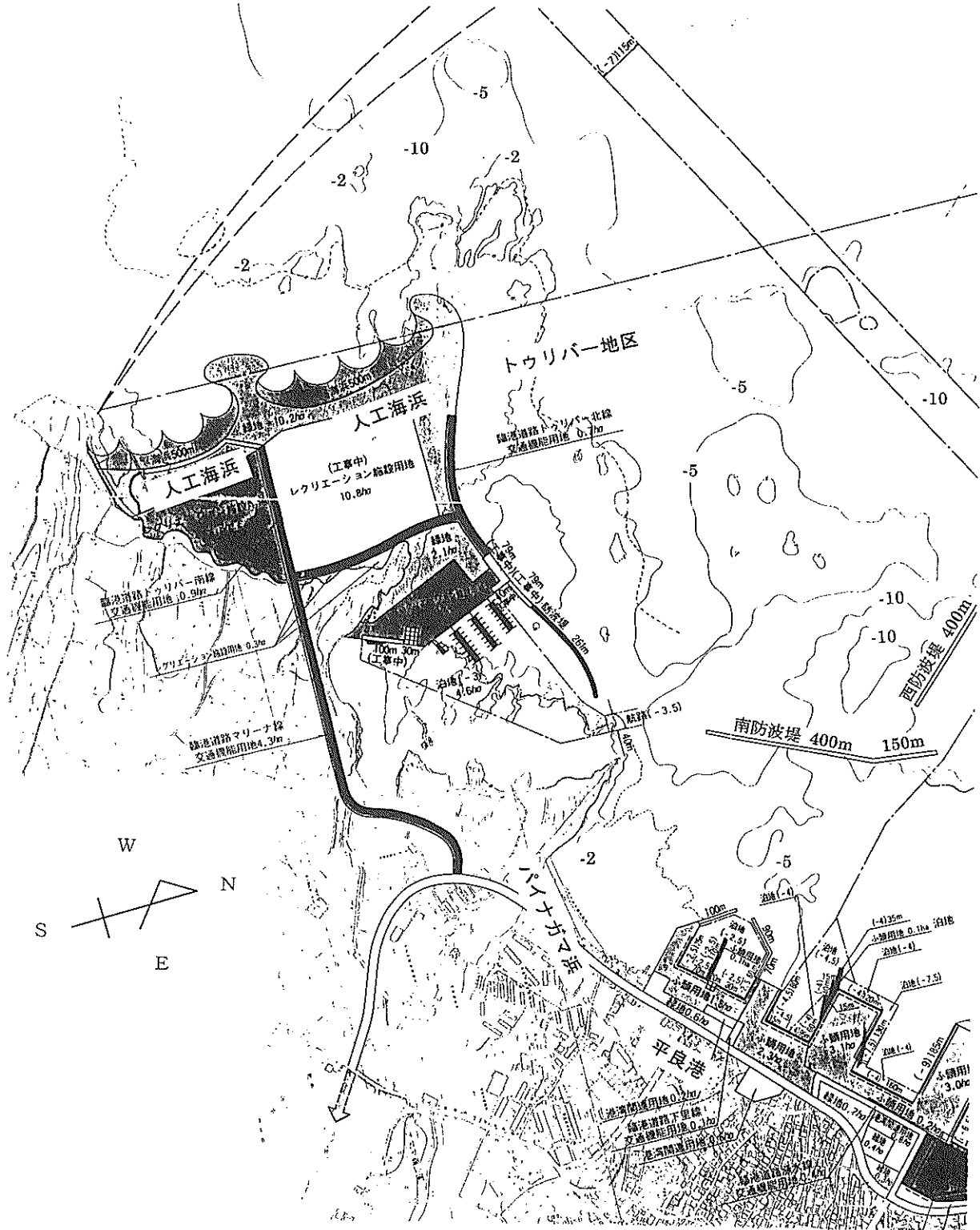
$u$  : 平均流れの x 方向成分

$v$  : 平均流れの y 方向成分

付録 パイナガマ浜における汀線変化再現計算

ここでは、既往調査において平良港トゥリバー地区人工海浜の汀線予測シミュレーションに用いた1-lineモデルの概要と計算手法、および当該人工海浜に隣接するパ

イナガマ浜における汀線変化の再現計算結果を示す。トゥリバー地区人工海浜とパイナガマ浜の位置関係を付図-1に示す。



付図-1 トゥリバー人工海浜とパイナガマ浜の位置

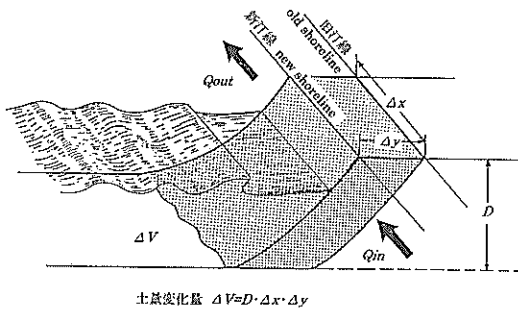
【汀線変化モデルの概要と計算方法】

(1) モデルの概要

1-line モデル (汀線変化モデル) は、波浪条件と海岸線形状のデータにより、沿岸方向の各点において沿岸漂砂量を算定し、海浜変形を一本の線の変化 (前進, 後退) で表現するモデルである。モデルの基本仮定は以下のとおりである。

- ① 海浜変化の要因としては沿岸漂砂を考える。
- ② 砂の移動はある移動高さ  $D$  の範囲内で生じる。
- ③ 海浜断面は岸沖方向に平行移動する。

モデルの概念を付図-2に、基本式を付式 (1) に示す。



付図-2 モデルの概念

$$D \frac{\partial y_s}{\partial t} + \left( \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad \text{付式 (1)}$$

$D$ : 漂砂の移動高さ

$\frac{\partial y_s}{\partial t}$ :  $t$  時間での汀線変化量

$\frac{\partial Q}{\partial x}$ : 沿岸漂砂量の増減

$q$ : 岸沖漂砂量 (河川流出土砂, 漂砂の損失等)

沿岸方向のある区間  $\Delta x$  に流入する沿岸漂砂量  $Q_{in}$  と流出する漂砂量  $Q_{out}$  との差分がその区間内の土砂変化量であり、これが上記の仮定と付式 (1) により、汀線変化量  $\Delta y_s$  に換算される。ここで、流入・流出漂砂量は、砕波点での波浪諸元より計算される波エネルギーの沿岸方向成分に係数を乗じた式により算定される。

(2) 計算手法

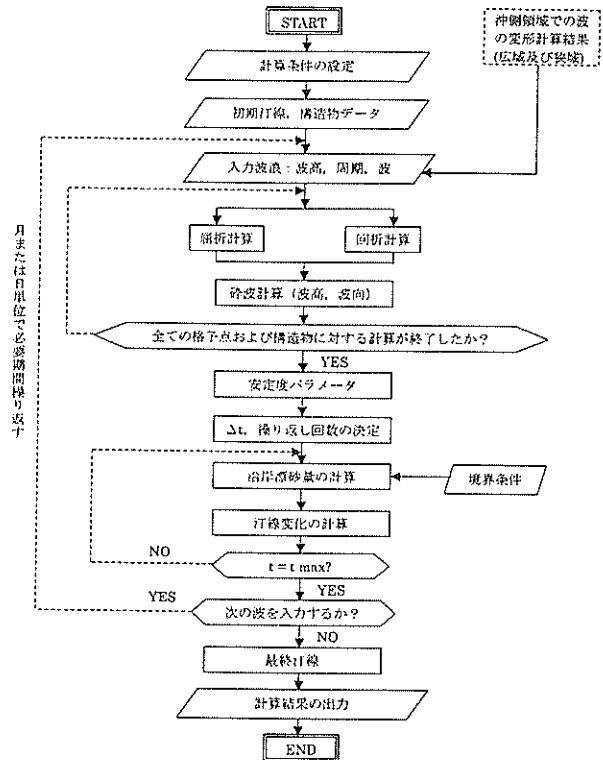
汀線変化モデルは、大別して次の3段階からなる。計算手順を付図-3に示す。

① 波の変形計算

② 沿岸漂砂量の計算

③ 汀線変化量の計算

以下に、各計算の概要を示す。



付図-3 汀線変化の計算手順

(2. 1) 波の変形計算

波の変形計算は、沖合いにおける波浪諸元から、海底地形による波の屈折、浅水変形、構造物背後の回折変形を計算し、対象地点における波浪諸元を求めるものである。さらに、対象地点が砕波帯内である場合には、砕波計算が実施される。ここで得られる波浪諸元は、波高, 周期, および波向きと、その平面分布である。

(1) 沖側領域での計算

沖側領域での波の場は、付式 (2) に示す不規則波を対象とした Karlsson (1969) のエネルギー方程式を用いて算出する。

$$\frac{\partial}{\partial x} (DV_x) + \frac{\partial}{\partial y} (DV_y) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (DV) = 0 \quad \text{付式 (2)}$$

ここで、 $D(f, \alpha)$  は波のエネルギー密度を表し、周波数  $f$  と波向き角  $\alpha$  の関数である。  $V_x, V_y, V$  は、それぞれ  $x, y, \alpha$  方向のエネルギー移流速度であり、次式によって表される。

$$V_x = C_g \cos \alpha \quad \text{付式 (3)}$$

$$V_y = C_g \sin \alpha \quad \text{付式 (4)}$$

$$V = \frac{C_g}{C} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \sin \alpha - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \alpha \right) \quad \text{付式 (5)}$$

ここで、 $C$ および $C_g$ は、波速および波の群速度である。付式(2)～(5)を解くことにより、計算領域内の波エネルギー $D$ の分布が得られる。さらに、不規則波の波高分布がレーリー分布に従うとして、有義波高 $H_{1/3}$ が次式で与えられる。

$$H_{1/3} = 4.004 \sqrt{M_0} \quad \text{付式 (6)}$$

$$M_0 = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D(f, \alpha) d\alpha df \quad \text{付式 (7)}$$

一方、波向きは、 $\alpha$ に関するエネルギー分布より、その重心方向(エネルギー平均波向き)として得られる。

## (2) 浅海域での計算

浅海域での波の計算は(2.1.1.)で求めた沿岸方向各点での波高と波向きをもとに漂砂量算定に用いる砕波波高と砕波波向きを求めるものである。波の屈折変形は平行等深線を仮定してスネルの法則を適用することにより、回折変形は合田(1977)による不規則波の方向分散法により求めている。

$$\text{屈折角} \quad \alpha = \sin^{-1} \left( \frac{C}{C_i} \sin \alpha_i \right) \quad \text{付式 (8)}$$

$$\text{屈折係数} \quad K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha}} \quad \text{付式 (9)}$$

$$\text{回折係数} \quad K_d(\theta) = \sqrt{P_E(\theta)} \quad \text{付式 (10)}$$

ここで、

$\alpha$  : 浅海域への入射波向

$\alpha_i$  : 求める地点での波向

$C$  : 浅海域での波速

$C_i$  : 求める地点での波速

$P_E(\theta)$  : 波向き $\theta$ に対する波エネルギー比の累加値

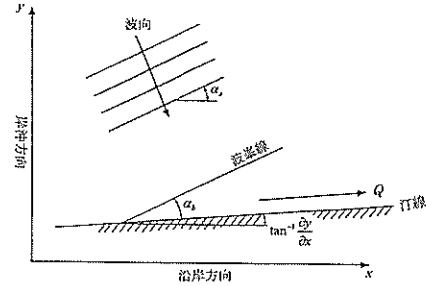
であり、ここではブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルと光易型方向関数より求められる

また、漂砂量算定に用いる砕波波高 $H_b$ は、付式(11)より求められる。

$$H_b = 0.8h_b \quad \text{付式 (11)}$$

ここで、 $h_b$ は砕波水深である。

なお、砕波波向きの定義を付図-4に示す。



付図-4 砕波波向きの定義

## (2.2) 沿岸漂砂量の計算

ここでは、構造物周辺の海浜変形現象を対象とするため、砕波波高の沿岸方向分布を考慮した小笹・Brampton(1979)の沿岸漂砂量式(付式(12))を用いている。

$$Q = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1-\gamma)} (E \cdot C_g)_b \cdot \left( K_1 \sin \alpha_b \cos \alpha_b - K_2 \frac{\partial H_b}{\partial x} \cot \beta \cos \alpha_b \right) \quad \text{付式 (12)}$$

$$\alpha_b = \alpha_x - \tan^{-1} \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad \text{付式 (13)}$$

$$E_b = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 \quad \text{付式 (14)}$$

ここに、

$Q$  : 沿岸漂砂量 (m<sup>3</sup>/s)

$K$  : 無次元係数

$\rho_s$  : 砂の密度 (2.65ton/m<sup>3</sup>)

$\rho$  : 水の密度 (1.03ton/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (9.81m/s<sup>2</sup>)

$\gamma$  : 砂の空隙率 (0.4)

$E$  : 波のエネルギー密度 (ton・m/s)

$C_g$  : 波の群速度 (m/s)

$H$  : 波高 (m)

$\tan \beta$  : 海底勾配

添え字  $b$  : 砕波点の諸元であることを表す

付式 (12) の第一項は波のエネルギーの沿岸方向成分であり、第二項は沿岸方向の波高分布によって生じる流れの効果を考慮したものである。

(2. 3) 汀線変化量の計算

汀線変化量は、付式 (12) の沿岸漂砂量式と付式 (15) に示す砂の連続式により求められる。また付図-3中に示す安定度パラメータは数値計算において安定解を得るための計算時間ステップを設定するものであり、付式 (16) で求められる。

$$D \frac{\partial y_s}{\partial t} + \left( \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad \text{付式 (15)}$$

$$\Delta t = 0.5 \frac{\Delta x^2}{(\varepsilon)_{\max}} \quad \text{付式 (16)}$$

$$\varepsilon = 2(E \cdot C_g)_b K_1 \cos\left(\frac{2\alpha_b}{D}\right) + (E \cdot C_g)_b 1.62 \frac{\partial H_b}{\partial x} \sin\left(\frac{\alpha_b}{D}\right) \quad \text{付式 (17)}$$

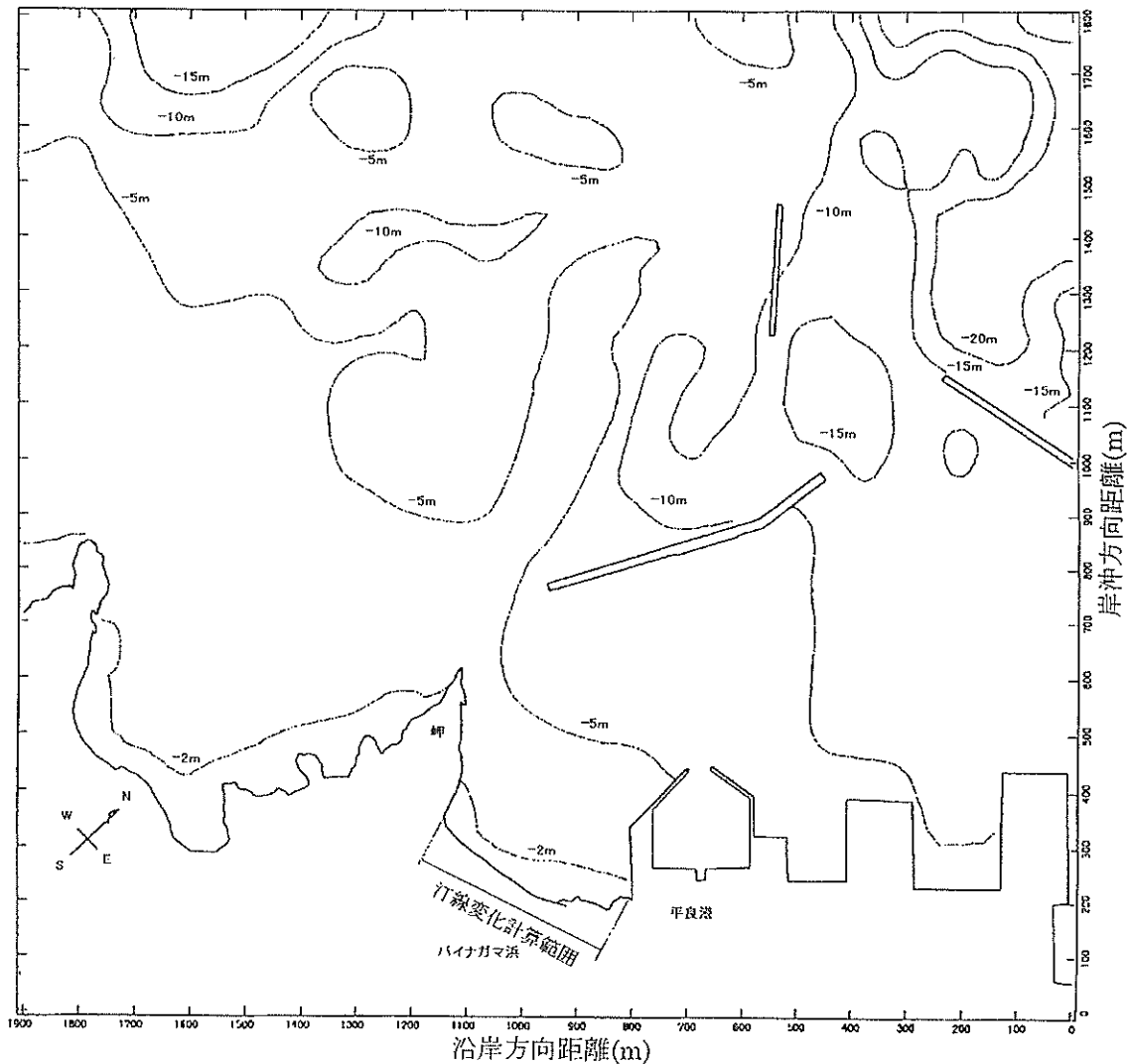
【汀線変化の再現計算】

ここでは、パイナガマ浜における汀線変化の再現計算を行う。

(3) 計算条件

(3. 1) 波浪変形計算

計算範囲は、付図-5に示すように、周辺の岬および平良港港湾施設を含む領域とした。沿岸方向距離は1,900m、岸沖方向距離は1,800m、計算格子間隔は20mである。



付図-5 パイナガマ浜における波浪変形計算の計算領域

地形条件は、海図および海底地形図をもとに作成した。珊瑚礁は汀線近傍に分布している。

波浪条件は、ここで対象とするパイナガマ浜がトゥリバー地区人工海浜に隣接していることから、本編 2. 4. で検討された結果を用いることとした。また、汀線変化計算に用いる波浪は、年間における波エネルギーを代表するエネルギー平均波を考えればよい。さらに、汀線変化においては入射波の波向きが重要となるので、作用させる波の波向き特性を十分に考慮する必要がある。したがって、ここでは波浪条件として表-2. 3に示した値を採用した。なお、波の方向集中度は、図-2. 7を参考に  $S_{max}=75$  とした。

波浪変形計算における計算条件一覧を付表-1に示す。

付表-1 波浪変形計算の計算条件一覧表

項目	条件
計算範囲	沿岸方向：1900m, 岸沖方向：1800m
格子間隔・点数	間隔：20m, 計算点数：96×91
地形データ	海図, 海底地形図
波浪条件	波向：S系；SW, N系；NW 波高： 0.7m 0.9m 周期： 6.0s 7.0s
波の方向集中度	$S_{max}=75$

### (3. 2) 汀線変化計算

計算範囲は、パイナガマ浜の砂浜域を十分に含む沿岸方向 440mとし、計算間隔は、汀線形状を十分に表現できるよう 10m 間隔（計算点数；45点）とした。

波浪条件は、(3. 1)における波浪変形計算結果とし、N系およびS系の波の発生頻度は、それぞれ 48.0% および 15.5%として与えた。

地形条件としては、パイナガマ浜は両端を岬および港湾施設に囲まれたポケットビーチであること、海浜前面の水深 4m 付近までの平均海底勾配は 1/40 であることなどが挙げられる。

計算期間は、パイナガマ浜において平良港建設に伴い港湾側（NE側）で汀線が前進する傾向が現れた、1977年から 1986年までの 10年間とした。

再現事象は、1986年に航空写真より得られた汀線形状とした。

汀線変化の再現計算条件一覧表を付表-2に示す。

付表-2 汀線変化の再現計算条件一覧表

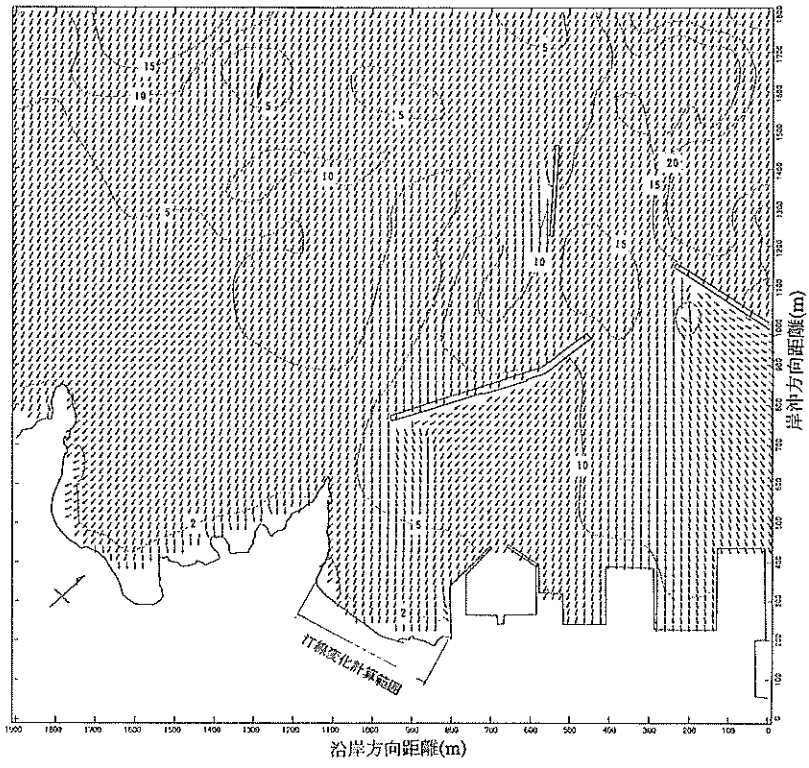
項目	条件
計算範囲	440m
格子間隔	10m
沖波波浪条件	波向：S系；SW, N系；NW 波高： 0.7m 0.9m 周期： 6.0s 7.0s 発生頻度： 48.0% 15.5%
計算期間	1977年10月～1986年10月 10年間
汀線データ	初期汀線：1977年10月 再現汀線：1986年10月 ともに航空写真より抽出
海底勾配	水深 4m 付近までの平均海底勾配 1/40
漂砂の移動高さ	$D=4.0m$
漂砂量係数	$K_r=0.0385, K_{r'}=0.81K_r$ (試行錯誤により設定した)
境界条件	NE側：流出入なし ( $Q_r=0$ ) SW側：流出入なし ( $Q_{r'}=0$ ) 岸側および沖側：流出入なし

### (3. 3) 再現計算結果

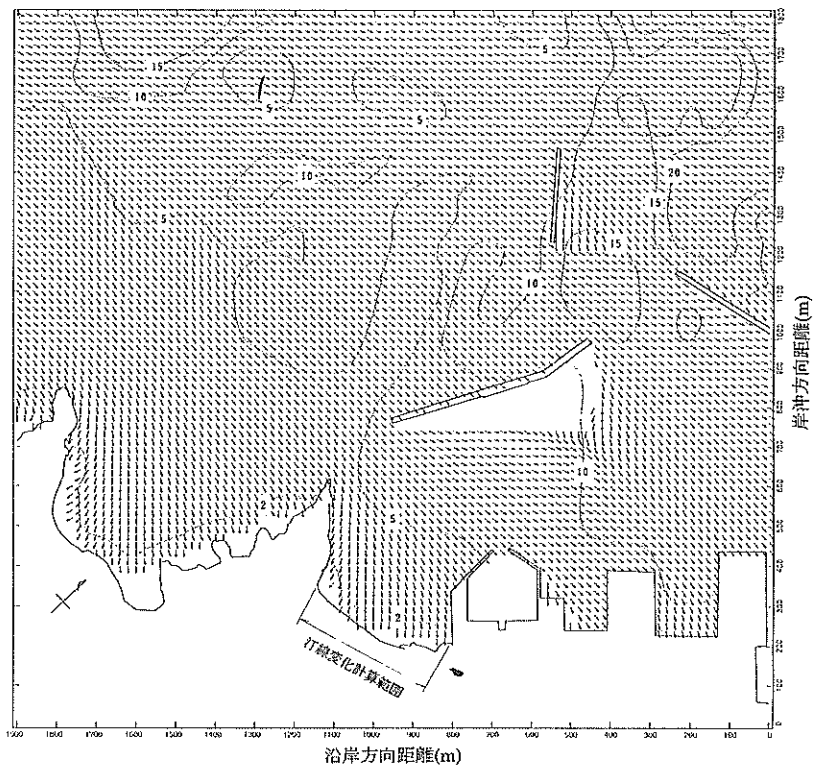
波向 NW および波向 SW における波向き計算結果を付図-6 および付図-7 に示す。これらの図より、パイナガマ浜前面における波向分布は、波向 NW の場合には平良港の沖防波堤の影響を受け、波向 SW の場合にはパイナガマ浜西側の岬の影響を受けることがわかる。

1986年における汀線変化の再現計算結果を付図-8 に示す。図中、点線は 1977年における初期汀線を示し、実線および破線は、それぞれ 1986年における汀線の計算値および実測値を示す。図より、計算値と実測値の汀線変化のバランスは良く一致している。なお、1986年における実測値は、全体的に汀線が前進しており、岸沖漂砂の影響が現れていると考えられる。したがって、沿岸漂砂に伴う汀線変化を対象とした本計算の再現性は良好であると判断される。

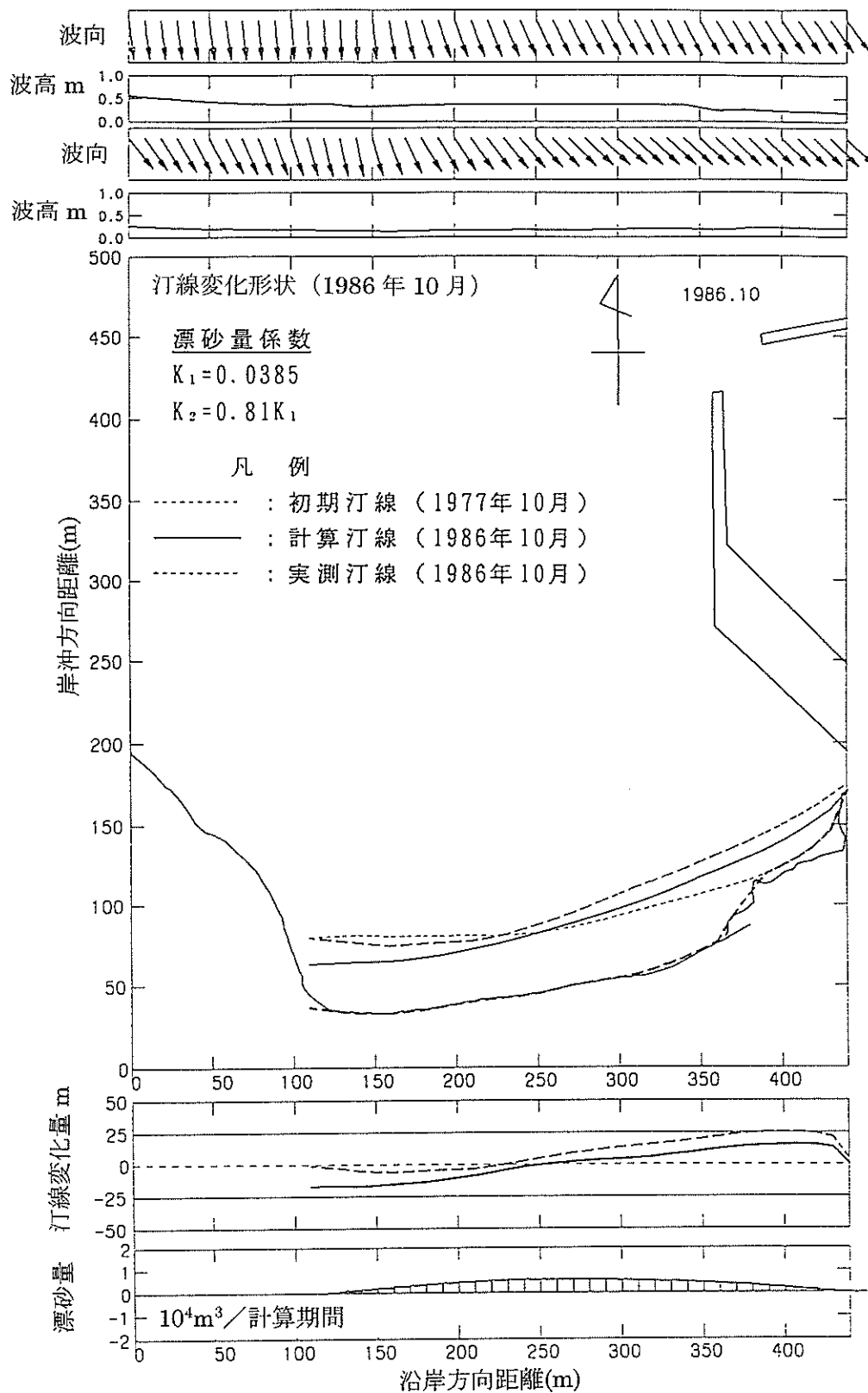




付図-6 波向 NW における波向き分布



付図-7 波向 SW における波向き分布



付図-8 1986年における汀線変化の再現計算結果

港湾技研資料 No. 948

1999.12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1999) by P.H.R.I

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。