

3-4 海岸保全事業の現況

3-4-1 既存施設の設計概要

(1) 設計基準

海岸工学はインドネシアではまだ比較的新しい技術分野に属している。これまで海岸保全関連施設の計画、設計は主として現場に関する経験を頼りに行われており設計基準はない。

(2) 既存施設

公・私的事業主体によるものを含め、バリ島における海岸保全事業の実施と既存施設との現況は別表に掲げる通りである。

人工養浜はこれまでも公共事業省以外の事業者により、個別的、局地的に行われてきた可能性があると考えられるが、それに関連する記録はない。

(3) 現況に基づく考察

調査地域内の既存施設の現況に関する調査の結果、各施設の設計において下記の配慮が払われていることが推定される。

1) 自然景観に対する人工構築物の違和感を柔らげるため、施設の高さは機能性を効果的に満たし得る最小必要限度の高さに抑えられている。例えば、離岸堤の堤頂や突堤の先端などは高潮位（HWL）と同じ高さになっている。同じ理由から、突堤構築材のコンクリート管は露出せず、自然岩石で覆われている。

2) 公・私的事業を問わず、調査対象地域内では、突堤や離岸堤の構築ばかりでなく、擁壁の工事にも、現場詰め充填コンクリート・パイルと補強鉄筋とを併用する工法が広く採用されている。

この種の工法の採用は、明かに現地材料の最大限利用と、潮間帯での人力施工を容易にするためである。

3-4-2 施工法

(1) 施工の基本的考え方

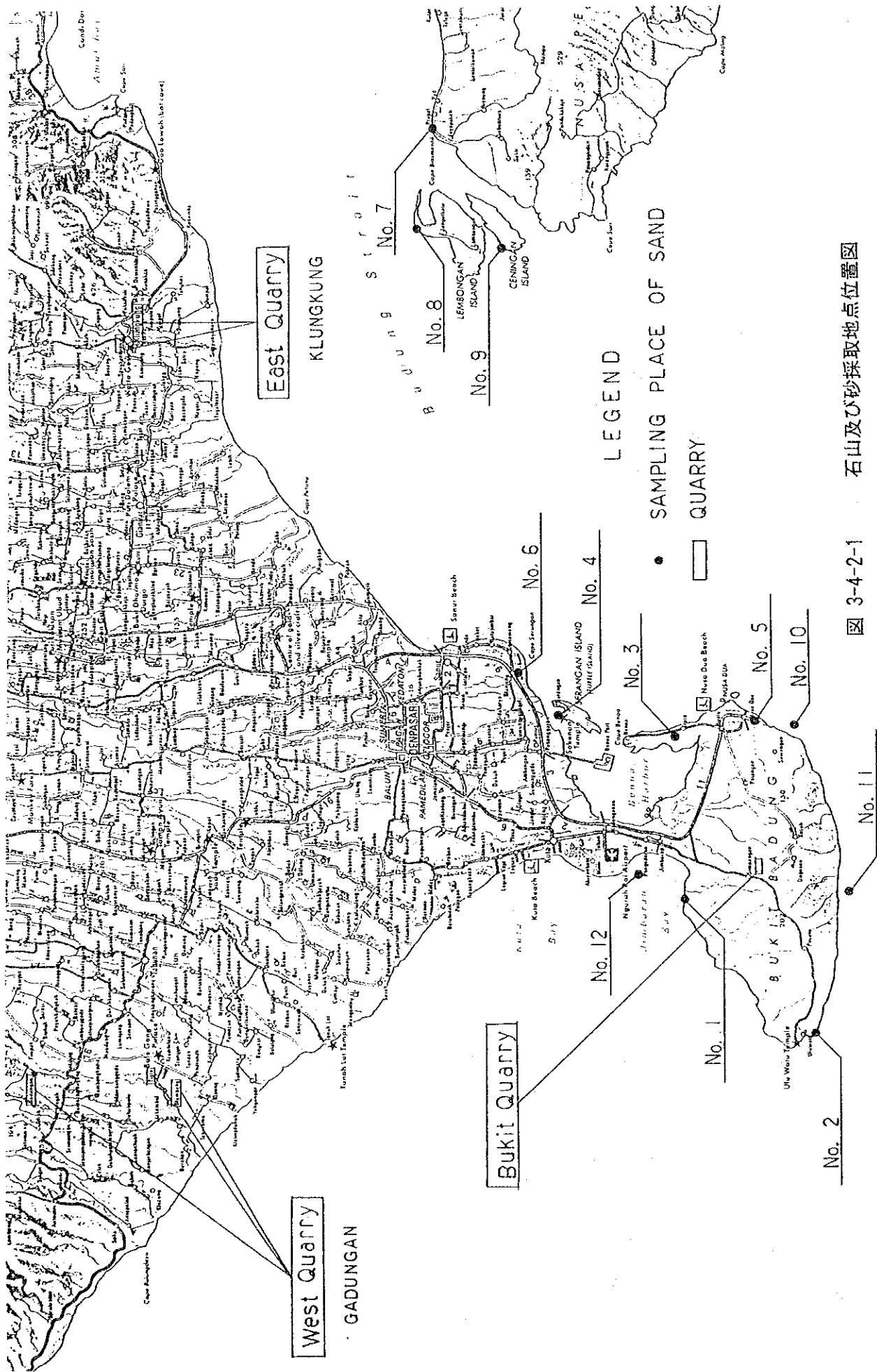
DPUによる海岸保全施設の施工の基本的考え方は次の通りである。

1) あらゆる施工材料は人力によって運搬されこれを組立てることによって現場で施工する。

2) 離岸堤の輸送ですら材料輸送は船舶による運搬を行わない。

(2) 施工材料

主要施工材料はセメント、砂利、砂、玉石である。この内、石材は次の3地点から供給される。



石山及び砂採取地点位置図 図 3-4-2-1

1) 東・石山

東・石山はデンパサールの東60kmに在る。砂利、砂は Unda 川の河川敷から採掘される。砂利、砂はオープンカットで採掘する。

玉石の多くは、Unda 川のダムの上流にある。石山は無計画な掘削により凹凸が激しく、この地区の道路は大きな穴を避けて通らなければならない。

2) 西・石山

西・石山はデンパサールの西30kmに在る。砂利、砂、玉石は YeI川の中流から採掘される。砂、玉石は人力とトラックを使って採掘する。大きな岩石が川の至る所にありトラック運搬を困難にしている。

3) Bukit 石山

Bukit 石山はデンパサールの南20kmに在り、石灰岩を産出する。石灰岩の採取は人力によって行われている。石灰岩は突堤等の表面仕上げに利用される。

4) 砂採取

養浜のための砂採取はこれ迄次の3地点で行われてきた。

- i. ヌサドゥア、Bualu Hotel の南
- ii. ヌサドゥアの北2 km、中国人墓地
- iii. サヌールの南、Surya Beach Hotel の西

5) 石の材質

東・石山、西・石山の石材は安山岩であり、コンクリート材料として適しており、量的にも問題はない。

東・石山、西石山、Bukit 石山と3個所の砂採取場の位置を図 3-4-2-1に示す。

(3) 道 路

バリ島には Denpasar、Karangasem、Singaraja、及び Gilimanukを通る舗装された環状道路がある。

東・石山、西・石山は何れも幹線道路沿いに在る。デンパサールを通る幹線の交通量は多い。特にデンパサールから西へ向かう道路はデンパサール市内へ砂利、砂を運ぶトラックで混雑している。幹線から東・石山、西・石山へ向かうアプロ道路は舗装されており、Desaによって規制されているが車員が狭いためトラックの通行が難しい。

3-4-3 DPUによる工事实績

(1) 概 要

DPUによってクタ、ヌサドゥア、サヌール・ビーチにおいて実施された保全対策工事は10基の突堤（延長 540m）、11基の離岸堤（延長 603m）、1基の護岸（延長36m）、7個所の養浜（総土量 108,150m³）である。

総工事費は Rp. 2,046,007,000である。

これ等の保全対策工事实績を表 3-4-3-1、図 3-4-3-1に示す。

(2) クタ（図 3-4-3-2）

離岸堤	1 基	70m
総工事費	Rp.	335,000,000

(3) ヌサドゥア（図 3-4-3-3）

突 堤	5 基	343m
離岸堤	5 基	373m
養 浜	6 個所	101,650m ³
総工事費	Rp.	1,795,067,000

(4) サヌール（図 3-4-3-4）

突 堤	5 基	197m
離岸堤	5 基	160m
養 浜	1 個所	6,500m ³
総工事費	Rp.	215,940,000

表 3-4-3-1 バリ海岸保全事業の実績

Area	Location No.	Type	Length or Volume	Amount (Rp)	Construction period	Remarks
Kuta	1.	off-shore groin	70 m	35,000,000	1984. 7. 24~1984. 12. 20	cylinder concrete blocks.
Kusa Dua	1.	groin	66 m	116,819,000	1986. 1. 3~1986. 3. 1	- do -
	- do -	Sand fill	15,000 m ³	82,882,000	- do -	- do -
	- do -	groin	30 m	100,335,000	1986. 12. 4~1987. 3. 19	cylinder concrete blocks.
	- do -	makeup by coral hill	96 m	27,600,000	1986. 12. 4~1987. 3. 19	- do -
	- do -	Sand fill	10,000 m ³	51,025,000	- do -	- do -
- do -	2.	groin	10 m	3,185,000	1984. 7. 24~1984. 12. 20	cylinder concrete blocks.
- do -	3.	groin	60 m	11,733,000	1984. 7. 24~1984. 12. 20	sand bags.
- do -	4.	off-shore groin	65 m	75,965,000	1986. 1. 13~1986. 3. 1	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	Sand bag	339 bags	938,000	- do -	- do -
- do -	5.	off-shore groin	148 m	196,637,000	1986. 1. 3~1986. 3. 1	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	Sand bags	960 bags	2,226,000	- do -	- do -
- do -	6.	off-shore groin	160 m	141,988,000	1987. 12. 2~1988. 2. 6	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	Sand hags	4,000 hags	12,203,000	- do -	- do -
- do -	- do -	makeup by coral hill		18,616,000	- do -	- do -
- do -	7.	groin	15 m	29,113,000	1986. 1. 3~1986. 3. 1	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	Sand fill	10,000 m ³	54,714,000	1986. 12. 4~1987. 3. 19	- do -
- do -	- do -	groin	15 m	56,037,000	- do -	- do -
- do -	- do -	makeup by coral hill	74 m	6,249,000	- do -	- do -
- do -	- do -	groin	40 m	35,518,000	1987. 12. 2~1988. 2. 6	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	makeup by coral hill		7,075,000	- do -	- do -
- do -	- do -	Sand bag	400 bags	1,193,000	- do -	- do -
- do -	8.	groin	76 m	79,193,000	1986. 1. 3~1986. 3. 1	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	groin	20 m	21,174,000	1986. 12. 4~1987. 3. 19	- do -
- do -	- do -	groin	7 m	7,412,000	- do -	- do -
- do -	- do -	makeup by coral hill	103 m	37,204,000	- do -	- do -
Sanur	1.	off-shore groin	80 m	46,690,000	1986. 10. 2~1987. 2. 7	cylinder concrete blocks.
- do -	- do -	Sand fill	6,500 m ³	39,583,000	- do -	- do -
- do -	2.	off-shore groin	80 m	36,000,000	1986. 7. 5~1986. 11. 4	cylinder concrete blocks.
- do -	3.	groin	77 m	13,682,000	1986. 10. 2~1987. 2. 7	- do -
- do -	4.	groin	60 m	19,985,000	1981. 7. 3~1981. 10. 31	cylinder concrete blocks.
- do -	5.	groin	60 m	32,597,000	1981. 3. 21~1981. 8. 20	- do -
- do -	- do -	Revetment	36 m	27,403,000	- do -	coral

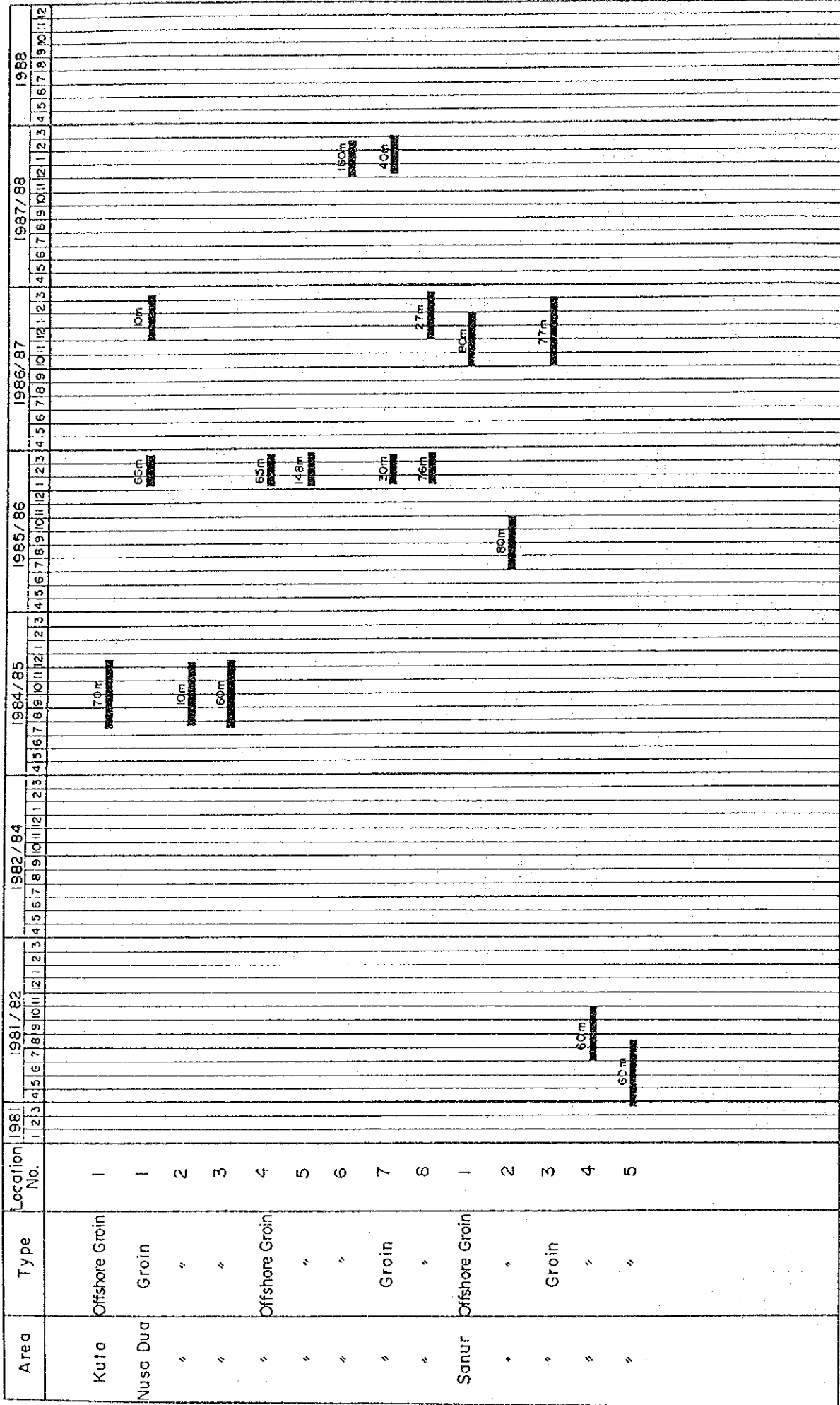


図 3-4-3-1 バリ海岸保全事業の実績

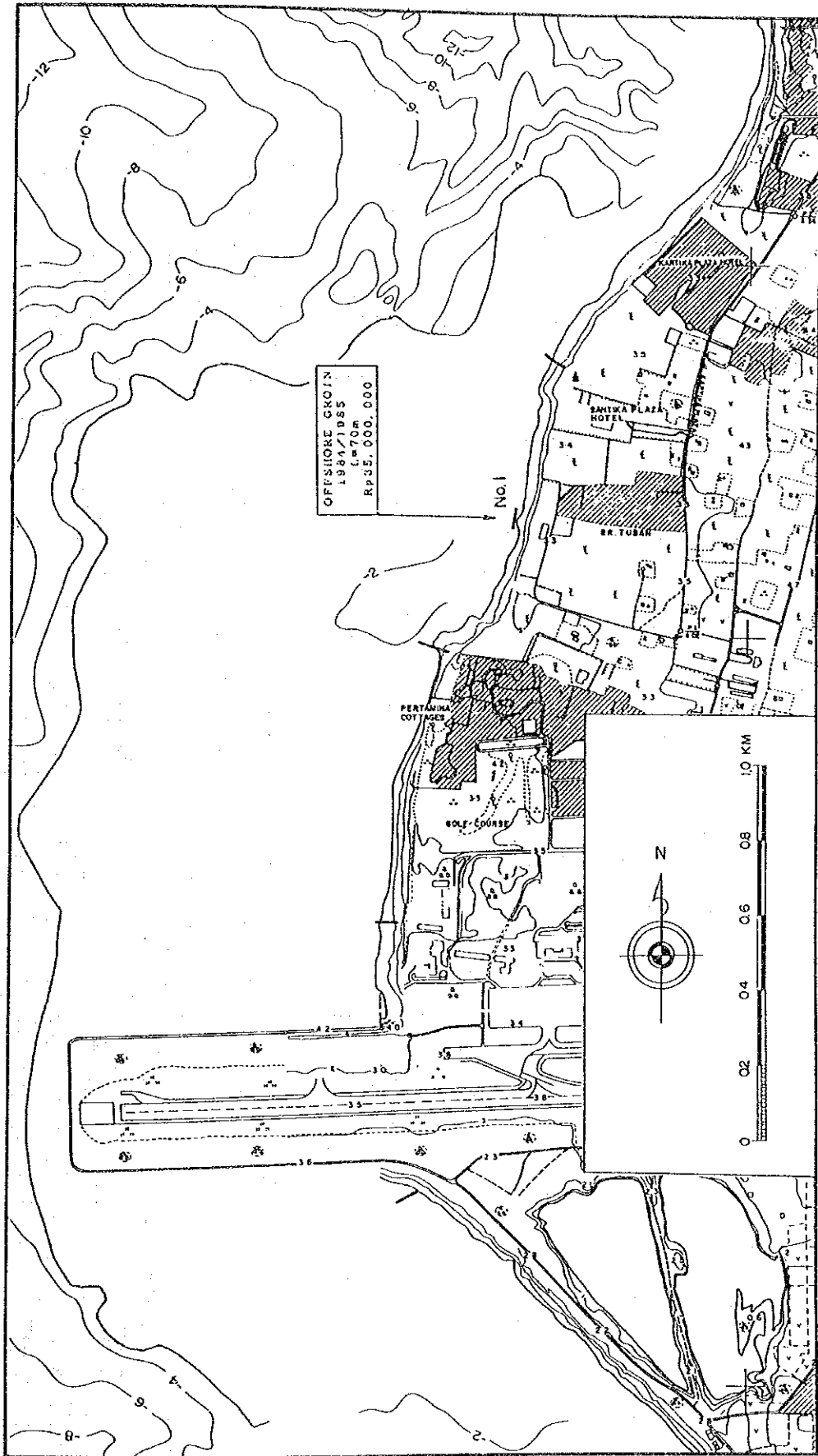


図 3-4-3-2 優食対策工事 (クタ)

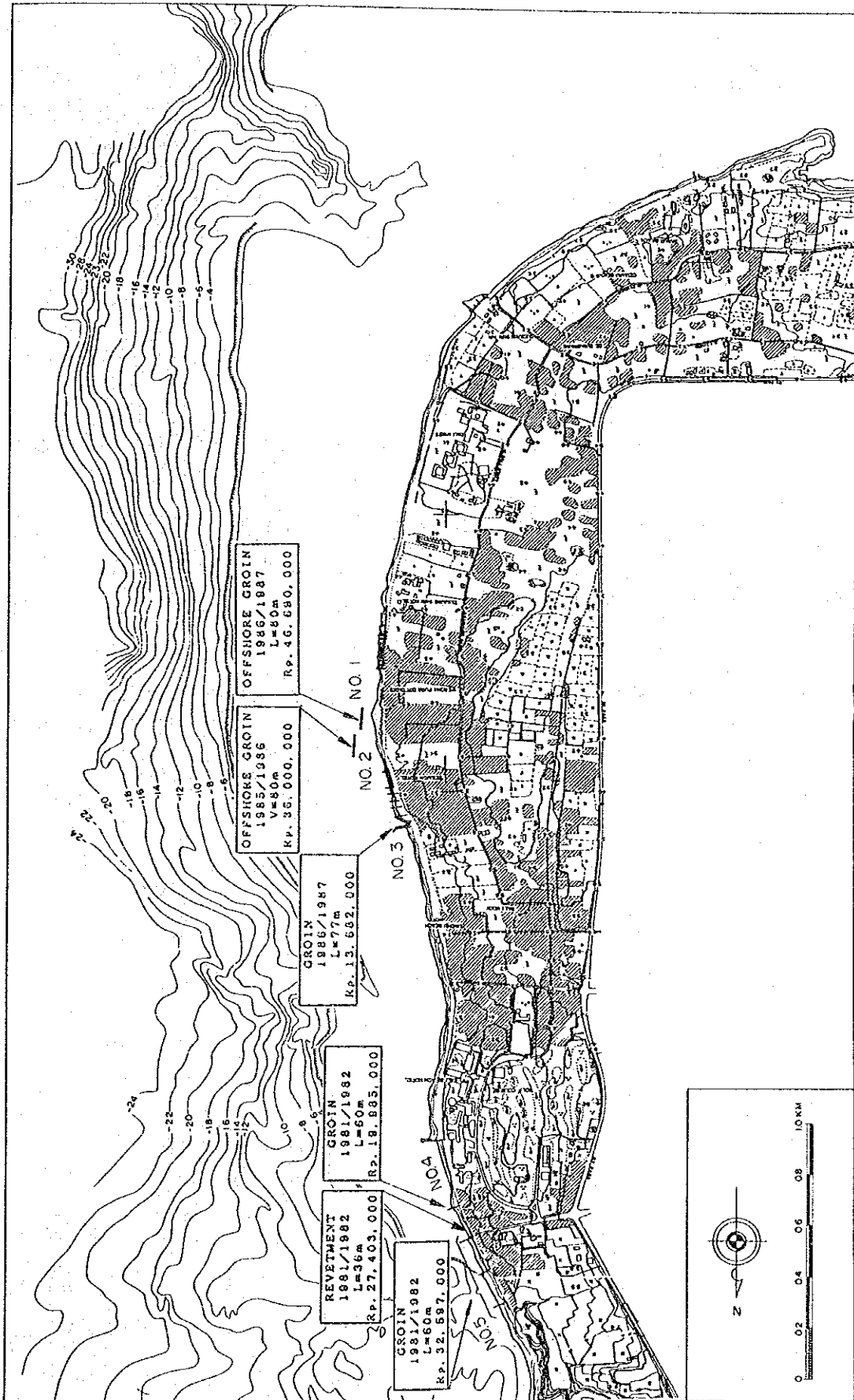


図 3-4-3-4 侵食対策工事 (サヌール)

3-4-4 砂の粒度分析

(1) 既存の砂の特性

3 海岸における砂の特性を 150m 間隔で調査した。海浜底質試料の採取位置図及びその粒度分析結果を図 2-5-2-8~13 に示す。粒度分析、比重測定及び鉱物組成試験結果を表 2-5-2-1 に示す。

これ等の結果から 3 海岸における砂の特性は次のように要約される。

- 1) 均等係数は No.57~No.61、及び No.93、95、96 において 2.0 である。
- 2) 曲率は 1.0 である。
- 3) 従って平均粒径分布は一率である。

粒度分析から 3 海岸における粗砂の分布が図 3-4-4-1~3 に示される。

- 1) クタ・ビーチは、一般的に細砂である。
- 2) ヌサドゥア・ビーチでは、B 点はおおむね粗砂であり、A 点は粗砂、細砂が混合している。
- 3) サヌール・ビーチでは A、B 点ともに粗砂、細砂が混合しているが、全体としては粗砂が多いと言える。ただし、No.105 以北は細砂である。

(2) 養浜工のための砂の特性

砂採取地点を図 3-4-2-1、その粗砂分布図を図 3-4-4-4 に示す。

- 1) 採取点 No.2、3、5、7 では粗砂であり、その他は細砂となっている。
- 2) 採取点 No.3、5、6 は過去において D P U によって養浜砂が採取された箇所である。

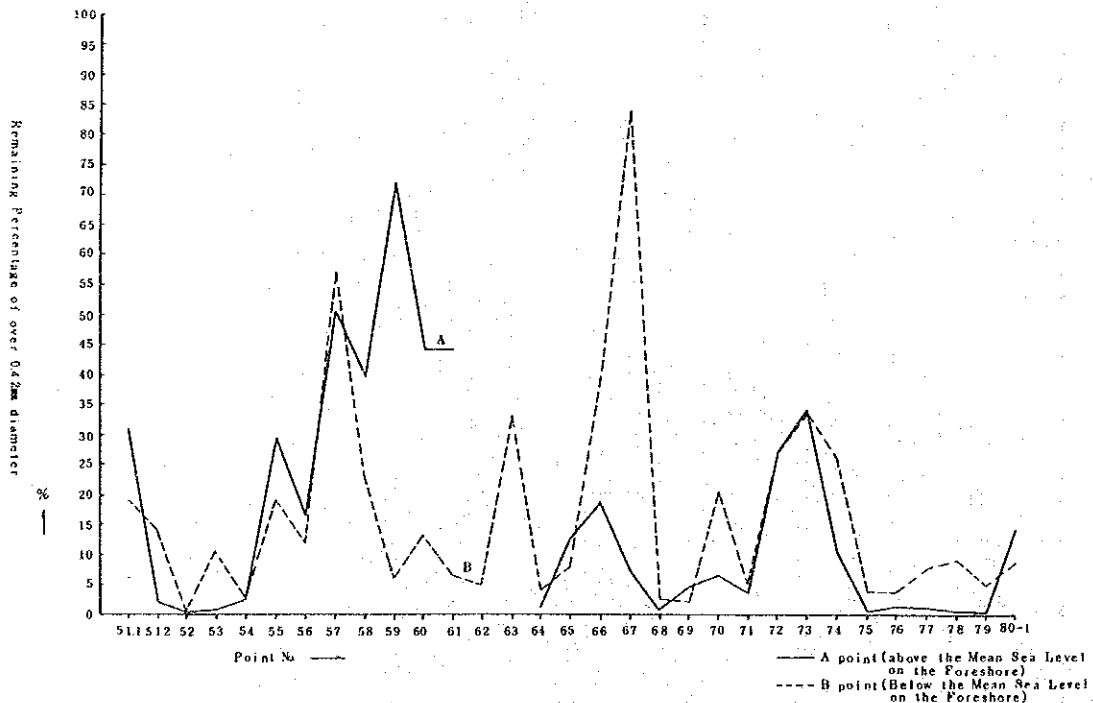


図 3-4-4-1 粗砂含有率 (クタ)

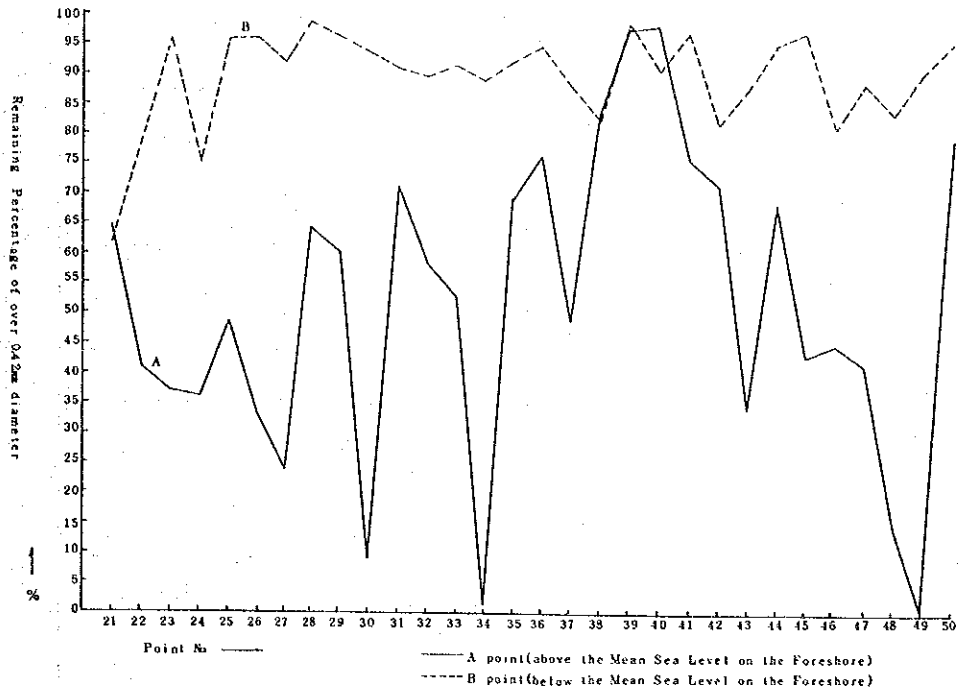


図 3-4-4-2 粗砂含有率 (ヌサドゥア)

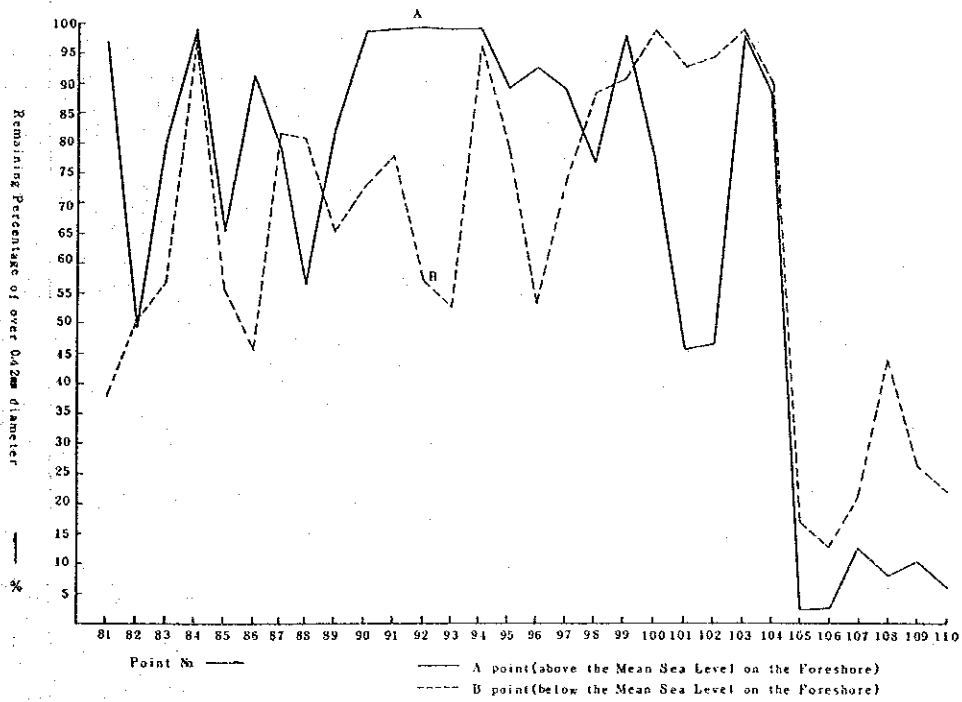


図 3-4-4-3 粗砂含有率 (サヌール)

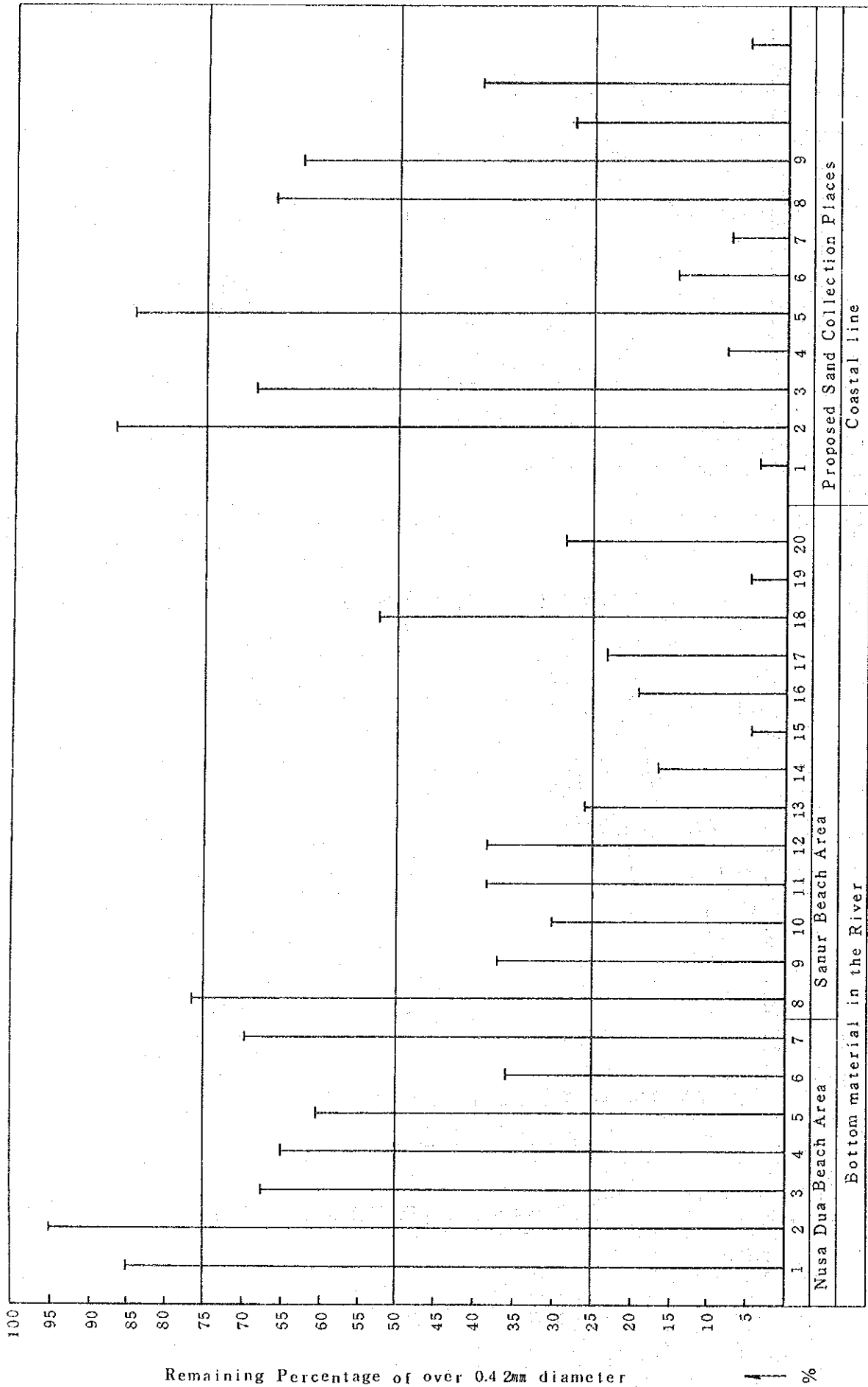


图 3-4-4-4 粗砂分布图

第4章 海岸侵食の原因

第4章 海岸侵食の原因

4-1 一般論

海岸侵食の一般的な諸原因について本節で論じ、次節で対象四地点に固有の原因をこれらに対照させる。本節は米国陸軍のCERC（海岸工学研究センター）により出版された海岸保全マニュアル（1984）に従う。

海岸保全の方策を講じる前に、海岸侵食の長期及び短期的な原因を明らかにすることが重要である。これを怠ると、その対策工が本来阻止せんとした海浜の変形過程をむしろ促進してしまうような設計、配置をしてしまうことになりかねない。海岸侵食は暴風時に最も顕著に進行するが、その他にもたくさんの自然及び人為的な諸原因があり、これらを検討しておく必要がある。

侵食の自然原因というのは、自然の作用に対する海浜の応答として発生するものであり、人為的侵食というのは、人間が自然系に対して手を加えた結果、生ずるものである。

人為的侵食は知識の欠如により生ずることが多く、適正な海岸管理を行うことにより軽減されうるものである。しかし、又ある場合には経済的な観点から重要な構造物のせいで海岸侵食が促進されることもある。このような構造物の必要性が優先されるときには、その構造物が海浜系に及ぼす影響をよく理解し、自然等によく調和する設計をして、その悪影響を十分に軽減し或いは除去するように努めなければならない。

(1) 自然原因

a. 海面の上昇

世界中の各地で、長期的な海面上昇が起っている。その結果、直接冠水することにより又は海浜が高くなった水位に対応して変形し、ゆるやかで長期的な海岸線の後退が起こる。

b. 沿岸域への土砂の供給の変化

干ばつをひきおこすような世界的な気候の変化があると、沿岸域に土砂を供給する河川の洪水発生回数が減少する。

c. 暴風による波浪と沖合へ向う海浜流

暴風が海岸線を襲ったときに生ずる高波は汀線付近の砂を沖へ運搬し、バーや浅瀬を形成する。暴風のあとの通常の波によりこの砂は再び汀線側に運ばれて砂浜が回復される。しかし、一般に一部の砂は永久に深みに落ち込んで砂浜側へ戻らない。これは暴風だけでなく沖側へ向う強い海浜流がある場合にも起こる。

d. 越波と高潮による流失

暴風による高潮と強い波の作用により起こる。波や越流水は海浜の砂を沖側へ運搬し堆積させる。

e. 飛 砂

風によって海岸表面の砂が飛ばされるという現象も海岸侵食の重要な原因となることがある。世界中の各地で大きな砂堆が波打ち際のずっと後方（陸側）にみられることのあるのは、海岸の砂が風により運ばれたものであることが多い。

f. 沿岸漂砂

汀線に斜めに入射する波により砂は沿岸方向に運搬される。こうして運び去られる砂の量が供給される砂の量を越えるとき、海岸侵食が起こる。

(2) 人為的原因

a. 地下資源の採掘による地盤沈下

海岸付近の地下にある天然ガス、石油、石炭、地下水等の天然資源の採掘により海岸付近の地盤沈下が起こることがある。これは海水面の上昇と同じ効果をもつ。

b. 漂砂の阻止

これが多分最も重要な人為的原因である。航路の掘削や港湾構造物による開口部の改良により、その部分への砂の捕捉が助長されることがある。下手側の海岸から流失した砂は破波帯の沖側に堆積したり、バーや浅瀬を形成したり、上手側の海岸を広くしたりすることが多い。サンド・バイパス工法によりこの影響は軽減されうる。侵食性の海崖のような漂砂の供給源の保護工も砂の供給の枯渇をもたらす。防砂堤のような構造物により汀線を変形させるときにも漂砂が阻止される。

c. 沿岸域への土砂供給の減少

海岸への土砂供給の主要な源が河川であることが多い。これら河川にダムが建設されると土砂が捕捉されるだけでなく、洪水流量も調節されて、土砂の海岸への供給が減少する。

d. 波浪エネルギーの海岸への集中

海岸壁のような構造物を砂の移動している部分又は後浜に建設すると、砕波による散逸する波のエネルギーが増大し、構造物付近の砂が運び去られ、侵食が助長することがある。

e. 海面変動量の増加

航路の掘削により港湾内の潮位変動が大きくなったり、より大きな波の侵入を許すことがある。これにより侵食が助長されることがある。

f. 自然の海浜保護機能の変更

海岸付近のバーや浅瀬の掘削により海岸での砕波エネルギー分布に変化の起こることがある。これが大きくなった所で侵食が助長される。海岸においても、砂堆の平坦化、海岸の植生の破壊、後浜の舗装、航路の掘削等も海岸侵食を助長し

うる。

g. 海浜からの土砂の採掘

世界中の各地で海浜土砂等の採掘が行われている。これは鉱物資源採取或いは建設資材としてであるが、いずれにしても沿岸土砂の直接の損失である。

4-2 調査地域の侵食原因

タナロットでは、海に面する島崖が波の作用で侵食していることが明らかであるが、その他の地点（クタ、ヌサドゥア、サヌール）は砂浜海岸であり、その侵食原因はいくつか考えられ、何が主因であるかは自明ではない。この問題を解く一つの手懸りは、数十年前まではこれらの海岸はほぼ安定していた（侵食も堆積の傾向もない）という伝聞である。

当時、海岸侵食が人々の関心事ではなかった可能性もあるので、その信憑性についてはやや問題はあるものの、深淺図や波浪に関する資料が不十分である現在、最近起った又は変化したことの内から侵食原因を捜すのが当を得ているように思われる。クタでは1969年に空港滑走路が海浜に突き出すような形で建設され、これが巨大な防砂堤の役割を果たしている。クタ及びサヌール・ビーチではサンゴ礁が活発に掘削されて水深が大きくなった地点では以前より大きな波が来襲するようになっている。以下では領域A、B、C…を用いて説明するがこれらは図 3-3-2-1, 4, 7に定義されている。又以下は第5-2節の計算機シミュレーションの結果にも基づいている。

(1) クタ

クタ・ビーチ特に領域Dでは、最近深刻な海岸侵食に悩まされている。その直接の原因は、高い波により砂浜が洗われて沖へ土砂が運ばれることである（自然原因d）。蛍光砂観測期間中、D領域では砂は南から北へ動いており、主に南西から入射するうねりも砂を南から北へ運ぶものと理解される。空港の滑走路は、この南から北へ運ばれようとする土砂を阻止していると考えられる（自然原因f、人為原因b）が、滑走路の南側に土砂の堆積傾向はない。これは滑走路に反射した波が土砂を反対方向に運ぼうとするためかも知れない。プルタミナコテージ前面は護岸で守られており、南西から入射する波も滑走路によりさえぎられて回折波以外はいってこないため、北への沿岸漂砂が抑えられており（人為原因c）、逆に回折波による循環流により、プルタミナコテージ前面の一部には土砂の堆積がみられる。サンゴ礁の掘削により今迄より高い波が海岸に到達するようになっており（人為原因f）、又サンゴ礁の発達していない海底、勾配の急な海岸線付近（領域F）から沖合へ土砂が流出している可能性が強い。（自然原因c）

(2) ヌサドゥア

ヌサドゥア・ビーチの領域B以外では、現存の突堤への土砂の堆積傾向から、主として北向きの漂砂が起こっていると考えられる。ヌサドゥアの名前の由来である2つの島は、昔は海岸から離れており現在は接続しているが、いずれにしても巨大な離岸堤と同様の効果をもつので、背後の海岸に沿岸漂砂の起こる余地はない（自然原因f）。ここ数年の養浜の成果で、ヌサドゥア・ビーチは全体として堆積傾向を示している。しかし、蛍光砂及び流速観測の結果によれば、サンゴ礁が未発達の深みへ落ち込む土砂の流れを阻止するために建設されたU字形の離岸堤の背後へ未だ土砂が流失しているようである。（自然原因c）

(3) サヌール

サヌール・ビーチは、バリハイアットホテルとサヌールビーチホテルの間で海岸線が急に曲っている。この点から北側では漂砂方向は主に北向きであり、南側では南向きであることが、砂の堆積傾向や蛍光砂及び流速の観測から推定できる。この漂砂が突堤や離岸堤で阻止されたとき、その下手側で侵食がみられ又上手側または背後で堆積がみられる。領域CとDでは、沿岸漂砂による流出量が流入量を上回るため侵食がみられる（自然原因f）。前述の海岸線が急に曲っている地点の前面海域（この更に沖側に海谷がある）に砂の堆積がみられる。これは他所から運ばれた土砂がここに運ばれたものと理解されるが、一方流速観測によればこの海域から沿岸両方向へ流出する流れがみられている。これはヌサドゥアの海谷付近でみられた流れのパターンと定性的に逆である。これは観測結果が単に短い期間の現象を代表している可能性もあり、将来の検討事項とされる。領域E（ワルダブラホテル前面）にある離岸堤により北向きの沿岸漂砂が阻止されるので下手側の領域Fでは侵食がみられる（人為原因b）。同じメカニズムでバリビーチホテル前面のヘリポートのために領域Hでも侵食が起こっている（人為原因b）。サンゴ礁の掘削により高い波がおしよせるようになっている（人為原因f）。いずれにせよ、ヌサドゥアとサヌールでは侵食がみられてもクタと比べると軽微である。

4-3 海浜物質の起源からみた沿岸漂砂方向に関するコメント

クタ、ヌサドゥア、サヌール・ビーチでの海浜物質は、磁性物質（比重約5、黒色、火山性）、塩酸溶解性物質（比重約2.7、白色、サンゴ礁又はサンゴ礁石灰岩）及びその他（石英、長石等）に分類できる。

クタでは、滑走路の両側では磁性物質が非常に少なく、北側では滑走路から離れるに従って次第に多くなる。この海浜は滑走路建設前は現在のように黒くはなかったそうである。北側で見られる磁性物質は北方の河川から供給されたものである。それゆえ滑走

路北側では磁性物質の正味の長期的な移動方向は滑走路建設後は南向きであったと推論できる。しかし、前節で述べたように海浜物質全体としては北向きの漂砂が起きていると推定される。

サンプルでも同様の事実がある。ホテルバリビーチの南側に磁性物質は殆どない(0.1～2%)のに対し、北側には多い(21～97%)。この磁性物質は北方の河川から来たもので、正味の磁性物質の沿岸漂砂方向は南向きである。一方海浜物質全体としては北向き漂砂と考えられている。

第 5 章 計画案の水理的検討

第5章 計画案の水理的検討

5-1 水理模型実験

模型実験の目的は、リーフ海岸において砂移動を生じさせる波及び流れの挙動を明らかにし、侵食対策工の効果を確認することである。上記目的のために、当節では、まずクタ、ヌサドゥア及びサヌールの各海岸で実施した現地調査について述べる。次に、長さ30m、幅0.5mの水槽を用いて実施された二次元実験結果について、現地現象の再現性の観点から検討を行う。最後に、長さ50m、幅50mの平面水槽内にクタ・ビーチとヌサドゥア・ビーチのモデル地形を造り、提案された侵食対策工の効果について水理実験の結果を述べる。

5-1-1 現地リーフ海浜の特性

(1) 波浪と流況

ヌサドゥア、クタ及びサヌールの各海岸に設置した波高計と流速計の配置を図2-3-3～5に示す。各々の海岸で測定された同時観測データを図5-1-1-1～5に示す。同図において、波高及び周期は有義波で表示されており、水位は横軸に示した時刻における計器位置での水位である。

図5-1-1-1はヌサドゥア・ビーチで測定された5月11日～16日間の観測記録である。図より周期15秒を越える波高約1mの波が沖合から入射して来ていることがわかる。しかし、リーフ上では沖波より周期が短かく、かつ波高も0.5m程度と低くなっている。図中のリーフ上のデータに出現している欠測は潮位変動によって計器のセンサー部よりも水位が低下したためである。沖合とリーフ上の水位変動は、両者ともその大きさ及び位相が完全に一致している。流速計No.1とNo.2のデータは図中下段に流速ベクトルと合成流速値で示した。流速計の設置位置(図2-3-4参照)を考慮すると、リーフ上の水がU型離岸堤近くのリーフ・ギャップから沖合へ流出していることがわかる。さらに、このリーフ・ギャップ部の流速は潮位の影響を大きく受けているが、流向は上げ潮時でも常に沖向きであり、南側地点のほうが北側よりも大きな流速値を示している。上記結果から、ビーチの砂はU型離岸堤近傍から沖合へ流失し、再び浜へ戻ることはないと考えられる。

図5-1-1-2にはヌサドゥア・ビーチに来襲した比較的大きな波の記録が示されている。リーフ上に出現している波は潮位が高いと大きく、潮位が低いと小さくなる。これは、リーフ・エッチ部が浅いために、リーフが時化の波から浜を防護するのに効果を発揮していることを意味する。

図5-1-1-3～4はクタ・ビーチの1988年3月と6月の観測データである。3月

24日から26日にかけて、北向きのかなり強い流れが発生している。この流れは、発生時の潮位変動がそれほど大きくないので潮汐によって引き越こされたものではなく、入射波によって生じたものと考えられる。

一方、6月のデータを見ると、波高2.5 mを越える波が入射しているが、リーフ上の波高は1 m未満と小さい。

図 5-1-1-5はサヌール・ビーチの記録である。当海岸では沖波は測定されていないので、近くのヌサドゥア・ビーチで観測されたデータを図中上段に併せて示した。リーフ・ギャップの両側に設置した流速計（図 2-3-5参照）の記録から、海水が常にリーフ帯に流入していることがわかる。この流況パターンは前述したヌサドゥア・ビーチの流況の結果と逆の結果を示している。これらの現象から判断すると、リーフ上の海水の水質問題においてリーフ・ギャップは海水循環の重要な因子であると言えよう。従って、リーフ帯に沖合から海水が流入してくるリーフ・ギャップはいかなる対策工においても、その切れ目は閉じるべきではない。

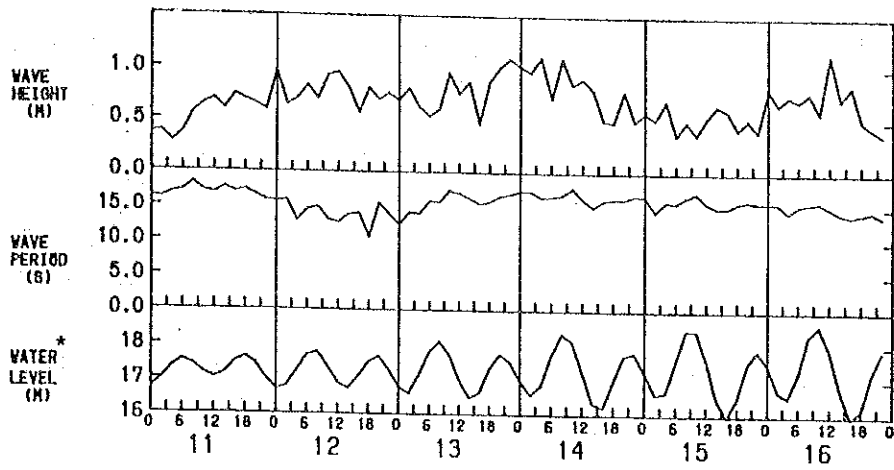
表 5-1-1-1にリーフ上で比較的大きな波の出現した時の波浪データをまとめた。この表にまとめた数値を用いて、波高、周期及び平均水位の上昇に関する検討結果を図 5-1-1-6～9 に示した。図 5-1-1-6は相対水深に対する周期比の関係を示したものであり、 H_o 、 T_o は沖波有義波高、周期を、 h はリーフ上の水深、 T はリーフ上観測波の有義周期である。この図より、リーフ上の波の周期は沖波よりも短くなることが理解できる。これは、リーフ・エッジ近傍で沖波が砕波し、いくつかの小さな波に再形成される現象によるものと考えられる。図中、クタ・ビーチのデータがヌサドゥア・ビーチのそれよりも上段に位置している。これはヌサドゥア・ビーチのリーフ・エッジの天端がクタ・ビーチよりも高いか又は広いためであり、ヌサドゥア・ビーチは天然リーフにより来襲波からより有効に防護されていると考えられる。

図 5-1-1-7は現地データに基づき相対水深と波高比との関係を示したものであり、 H はリーフ上の波高を表わし、他の記号は前述と同一である。図示されたデータは線形関係にあり、図中の直線は回帰直線で、 r は相関係数である。リーフ上の波高は回帰直線によって良く表わせることが理解できる。さらに、定数項の小さな値(0.08)を無視すると、回帰式は $H=0.37h$ となる。これより、リーフ上の出現波高はリーフ上の水深のみで決定され、水深の約40%と見積られ、沖波入射波には関係しないことがわかる。

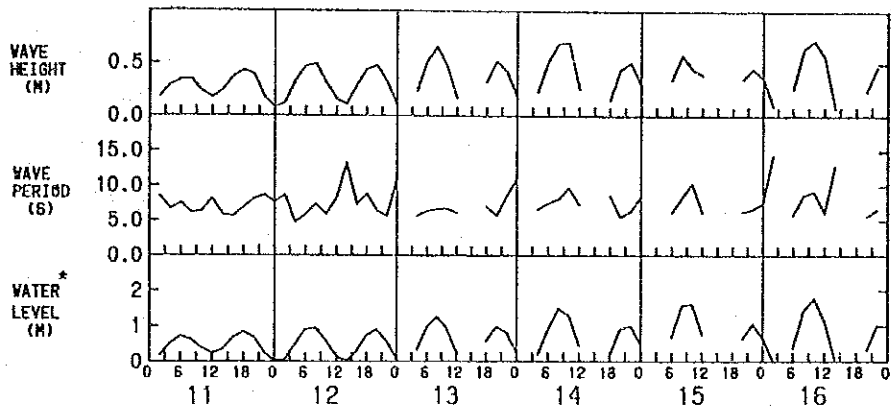
最後に、沖波入射波と平均水位の上昇量との関係について述べる。平均水位の上昇はリーフ上の水深に関係するので、前述した如くリーフ上の水深を決定する重要な因子の1つである。そこで、静穏な海象条件下では沖合とリーフ上との水位差がないものと仮定して、高波浪時の両地点の水位差を計算した。その結果を

OFFSHORE

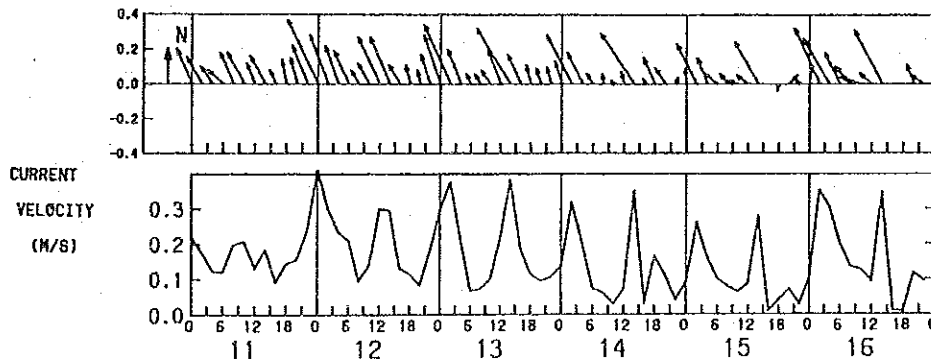
MAY, 1988



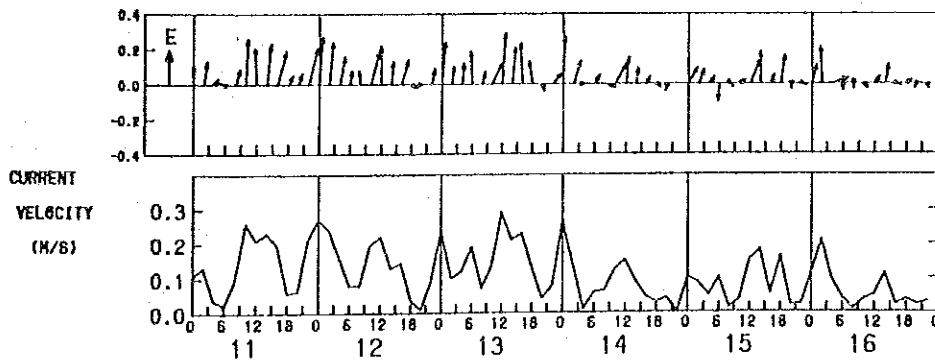
REEF



NO. 1



NO. 2

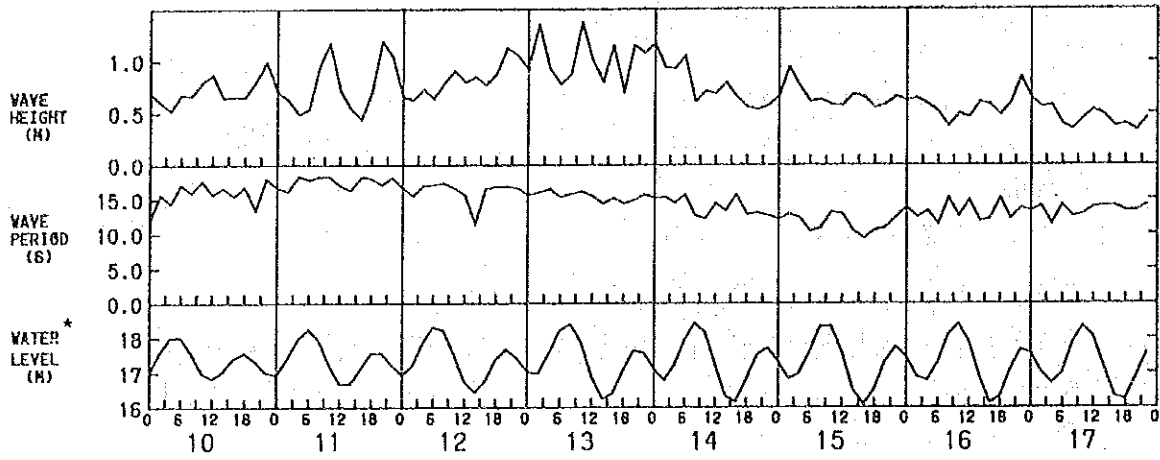


*) expressing sea level above the sensor of the wave gauge installed on the sea bed.

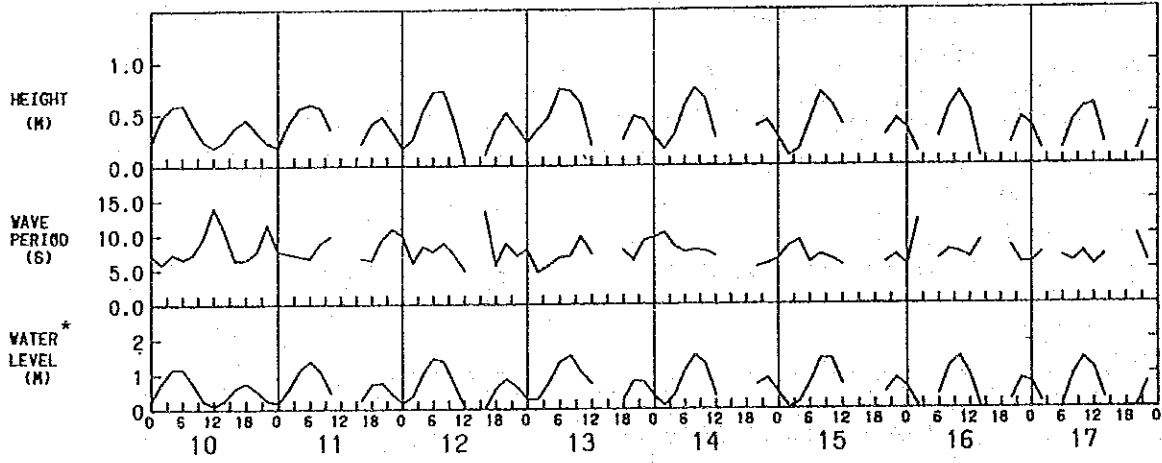
図 5-1-1-1 波浪・潮流実測記録 (ヌサドゥア、4月)

OFFSHORE

JUNE, 1988

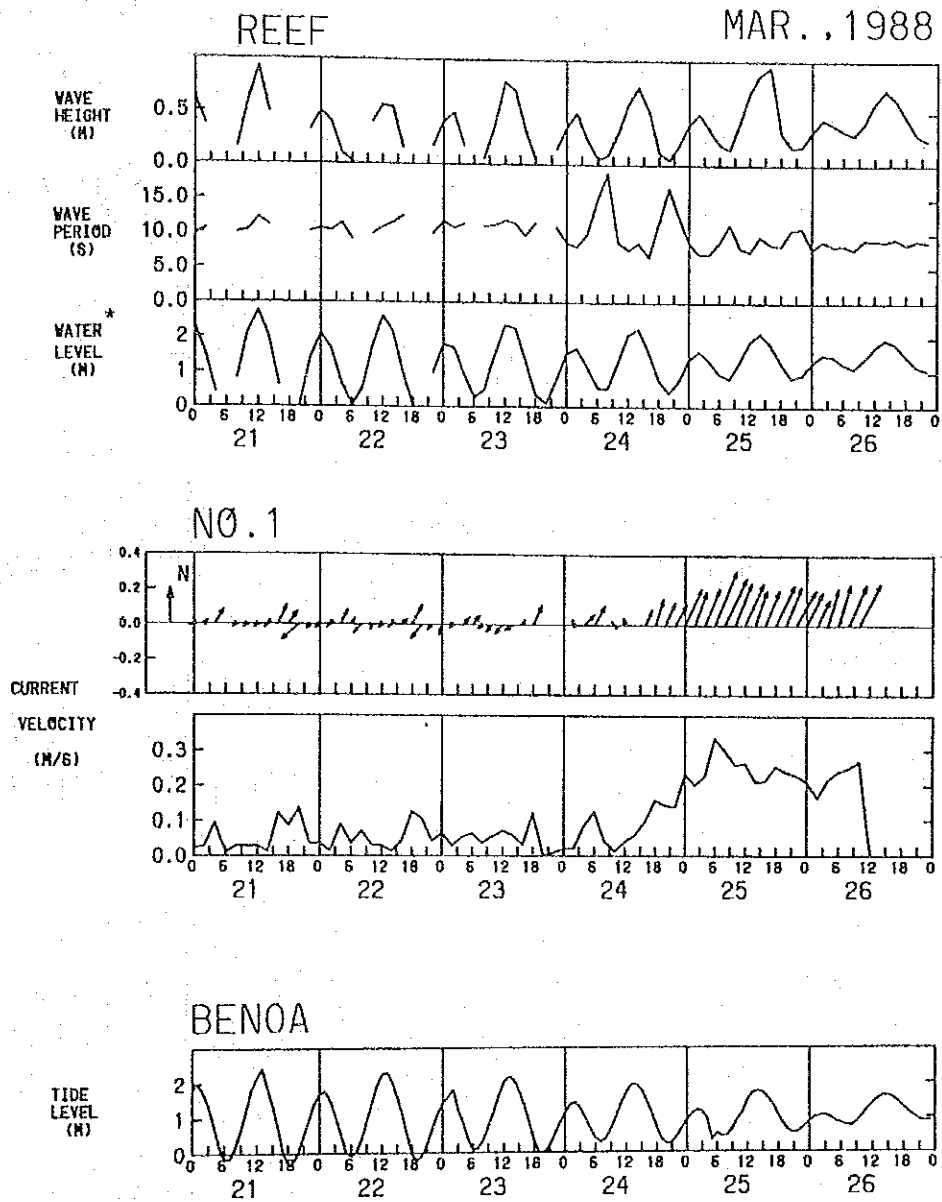


REEF



*) expressing sea level above the sensor of the wave gauge installed on the sea bed.

図 5-1-1-2 波浪・潮流実測記録 (ヌサドゥア、6月)

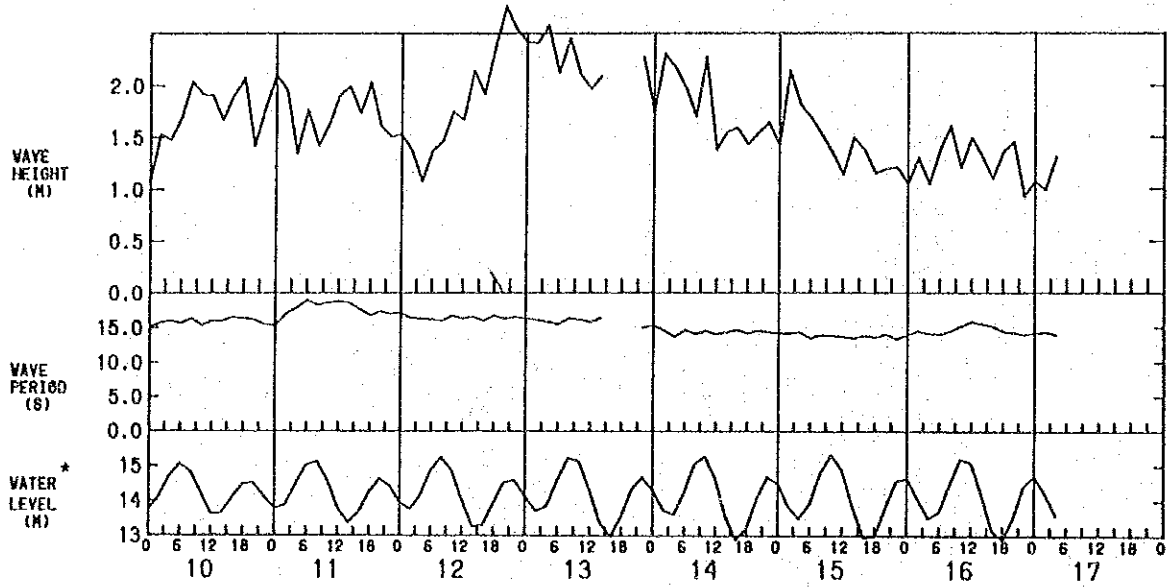


*) expressing sea level above the sensor of the wave gauge installed on the sea bed.

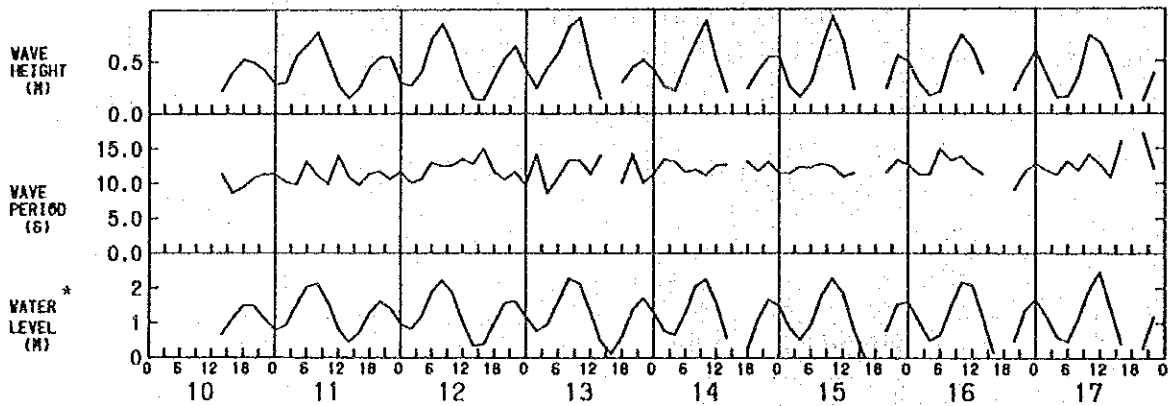
図 5-1-1-3 波浪・潮流実測記録 (クタ、3月)

OFFSHORE

JUNE, 1988



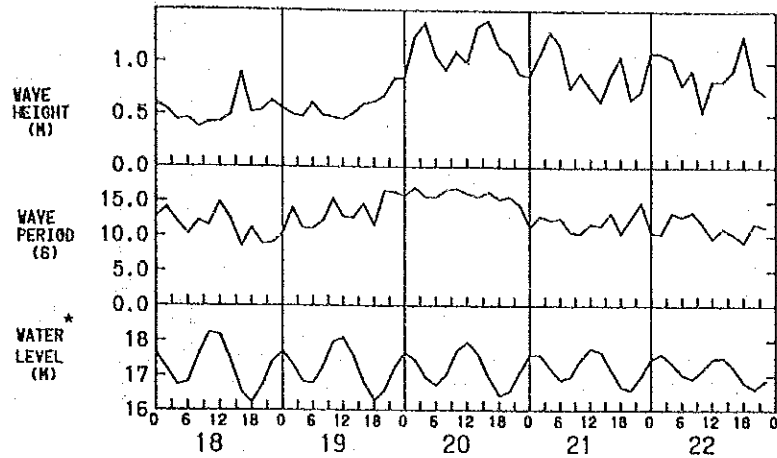
REEF



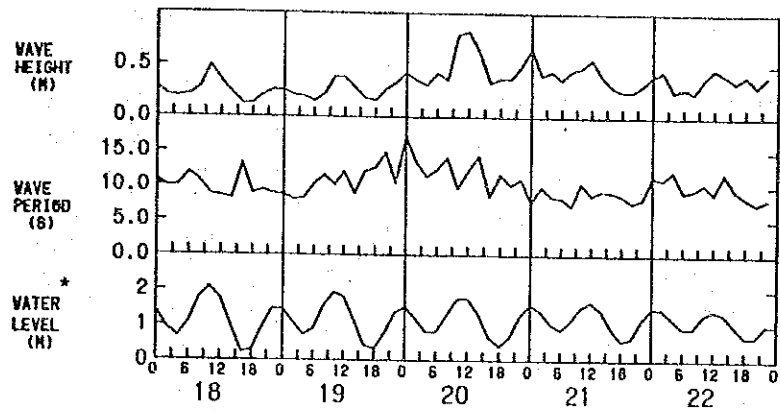
*) expressing sea level above the sensor of the wave gauge installed on the sea bed.

図 5-1-1-4 波浪・潮流実測記録 (クタ、6月)

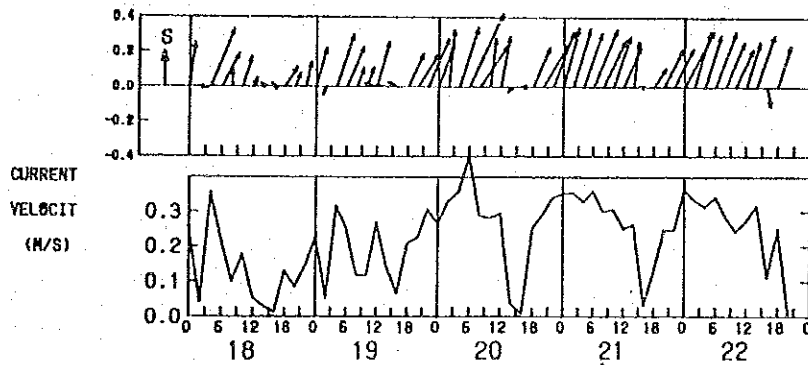
OFFSHORE (NUSADUA) JUNE, 1988



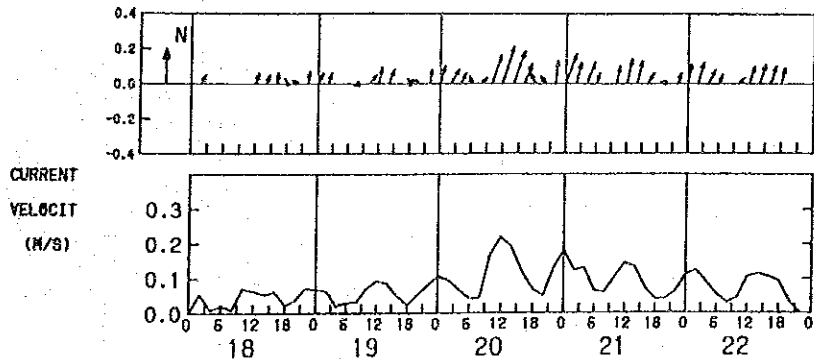
REEF



NO. 1



NO. 2



*) expressing sea level above the sensor of the wave gauge installed on the sea bed.

図 5-1-1-5 波浪・潮流実測記録 (サヌール、6月)

表 5-1-1-1 波浪観測データ

(NUSA DUA)

(KUTA)

(SAMUR)

Month	Day	Time	Reef			Offshore		
			H (m)	T (s)	h (m)	H ₀ (m)	To (s)	h ₀ (m)
May	13	5	0.52	6.4	1.48	0.54	15.8	18.30
		8	0.66	6.6	1.76	0.61	15.7	18.60
		10	0.47	6.7	1.42	0.86	17.4	18.21
	14	6	0.52	7.5	1.40	0.72	16.6	18.21
		8	0.69	8.1	1.99	1.10	16.8	18.84
		10	0.70	9.7	1.79	0.85	17.8	18.63
	16	8	0.64	8.7	1.93	0.78	15.8	18.81
		10	0.72	9.2	2.27	0.99	16.0	19.13
		12	0.57	6.1	1.62	1.15	15.2	18.46
	June	12	5	0.53	8.4	1.52	0.73	17.0
7			0.71	7.5	1.95	0.64	17.1	18.81
9			0.72	8.8	1.85	0.79	17.3	18.72
13		7	0.74	6.8	1.85	0.78	15.4	18.72
		9	0.72	7.0	2.03	0.88	15.8	18.90
		11	0.59	9.8	1.54	1.37	16.1	18.36
14	7	0.58	7.5	1.50	1.05	15.6	18.42	
	9	0.74	7.8	2.03	0.61	12.6	18.83	
	11	0.64	7.6	1.77	0.71	12.2	18.66	
15	7	0.42	5.0	1.23	0.61	10.4	18.09	
	9	0.70	7.1	1.93	0.63	10.8	18.84	
	11	0.59	6.5	1.93	0.58	13.1	18.84	
16	9	0.55	7.7	1.70	0.37	15.2	18.60	
	11	0.70	7.4	1.97	0.49	12.5	18.90	
	13	0.52	6.6	1.44	0.46	14.8	18.36	

Month	Day	Time	Reef			Offshore			
			H (m)	T (s)	h (m)	H ₀ (m)	To (s)	h ₀ (m)	
June	11	4	0.56	9.9	2.00	1.35	17.9	14.89	
		6	0.66	13.2	2.54	1.77	19.0	15.53	
		8	0.78	11.1	2.62	1.42	18.3	15.63	
		10	0.52	10.0	2.07	1.63	18.6	15.07	
12	6	5	0.72	13.0	2.38	1.37	16.2	15.38	
		8	0.86	12.5	2.73	1.46	16.0	15.74	
		10	0.65	12.6	2.38	1.75	16.7	15.38	
		13	6	0.58	10.8	2.11	2.13	15.5	15.09
14	8	6	0.83	13.4	2.77	2.45	16.3	15.73	
		10	0.92	13.3	2.64	2.11	16.1	15.63	
		12	0.50	12.6	2.09	1.38	14.1	15.13	
		15	8	0.62	12.8	2.29	1.53	13.9	15.29
15	10	8	0.93	12.5	2.79	1.35	13.8	15.81	
		12	0.69	11.0	2.36	1.14	13.7	15.39	
		16	8	0.56	13.3	1.98	1.60	14.5	14.98
		10	0.75	13.9	2.67	1.21	15.2	15.70	
12	8	6	0.62	12.3	2.60	1.49	15.8	15.60	

* : This data is observed at the offshore of Nusa Dua Beach.

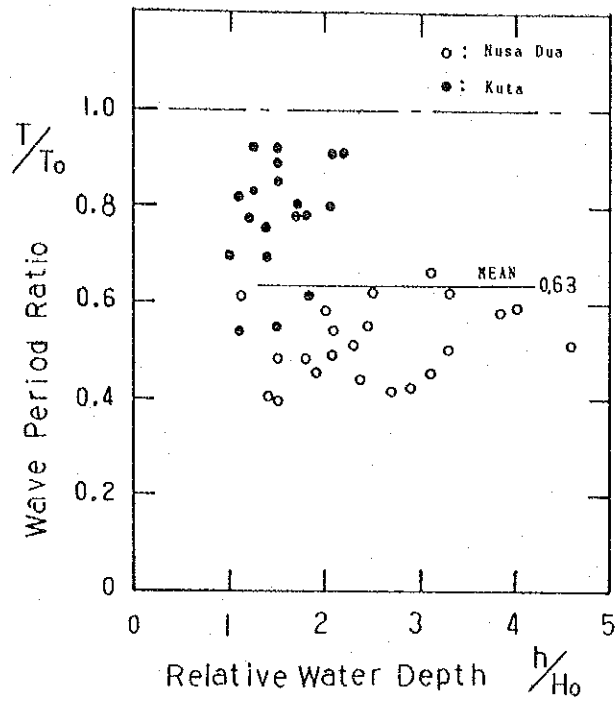


図 5-1-1-6 周期比と相対水深の関係

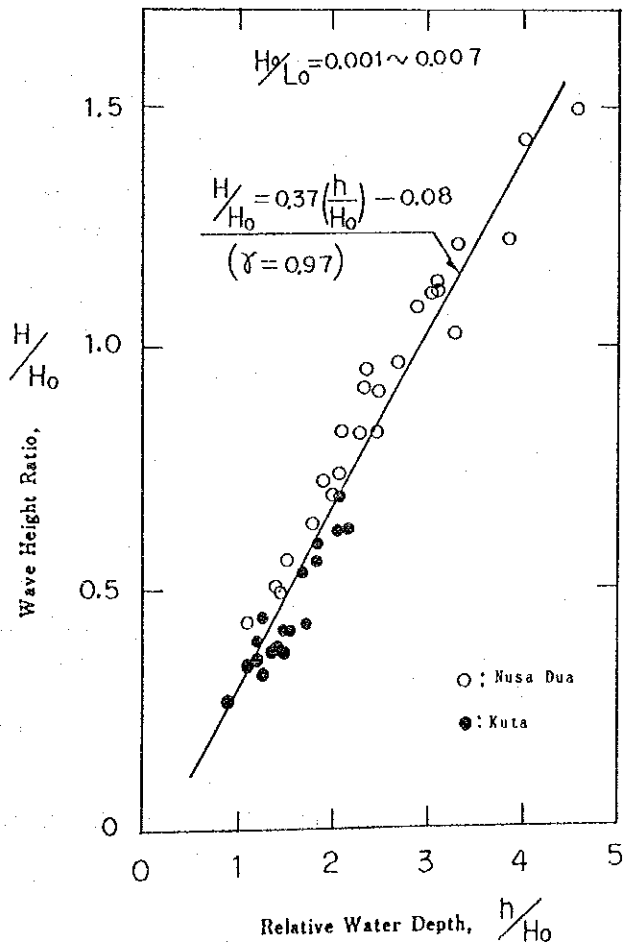


図 5-1-1-7 波高比と相対水深の関係

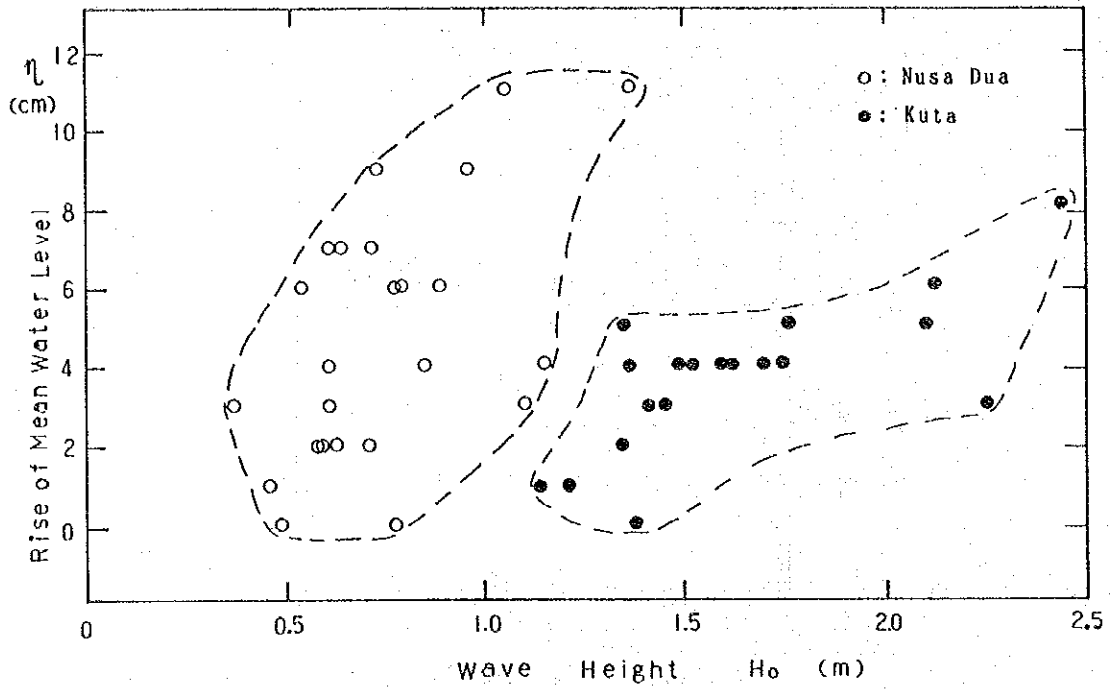


図 5-1-1-8 平均水位の上昇と波高の関係

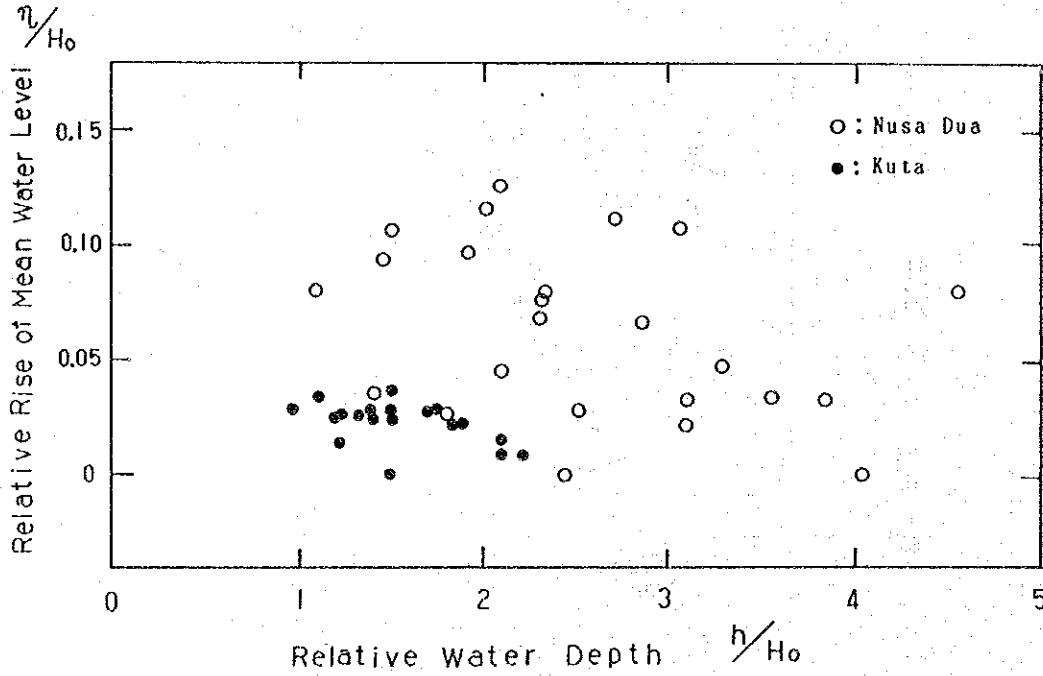


図 5-1-1-9 平均水位の上昇と相対水深の関係

図 5-1-1-8~9 に示す。これによれば、沖波波高の増大に伴ない水位が上昇する傾向が認められるが、その絶対値と沖波波高との比は、当観測データの範囲内においてそれぞれ最大12cm及び最大15%程度である。波高に関する回帰解析結果から、リーフ上の平均水位の最大上昇量はリーフ上の波高を約5 cm増大させるものと見積られる。

(2) 潮 位

潮位はリーフ上に海岸構造物を設計したり、リーフ上の入射波特性を明らかにする上で考慮しなければならない重要な要素である。バリにおける潮汐の主要分潮は表 5-1-1-2に示される如く調和解析によって得られている。

バリ島ではヌサドゥア・ビーチの北側に位置するベノア港において潮位観測が実施されており、かつ上記分潮を用いて予測もなされている。両者を比較した結果を図5-1-1-10に示した。予測曲線は位相と振幅とも良く観測値と一致している。

図5-1-1-11は当調査の使用に供するためにまとめた潮位基準である。ここに、MHWとMLNは1988年に出現した平均最高高潮面と平均最低低潮面である。MHWSTとMLWSTは $(M_2 + S_2)$ 分潮より求まる大潮時の平均高潮位と平均低潮位であり、各々平均海面を基準に表わされている。DLは $M_2 + S_2 + K_1 + O_1$ の四分潮の振幅和を平均海面下にとった基準面である。通常、各種海岸構造物の天端高や堤体の安定性を検討する場合、MHW (MSL + 1.30m) を用いる。また、潮位の高い時にリーフ上へ大きな波が伝播し、砂浜に押し寄せて来るので、MHWを水理実験の水位を設定する場合に考慮に入れるべきであろう。

さらに、各海岸の潮位差を見るために、実測データの比較を行った。図5-1-1-12はクタ (沖合)、ヌサドゥア (沖合とリーフ上) の実測水位とベノア港の予測結果を時刻を一致させて示したものである。これによれば、各地点の潮位変動は良く一致し、振幅と位相とに全んど差のないことがわかる。従って、ベノア港の予測データが各海岸の工学的検討に適用できることが明らかとなった。

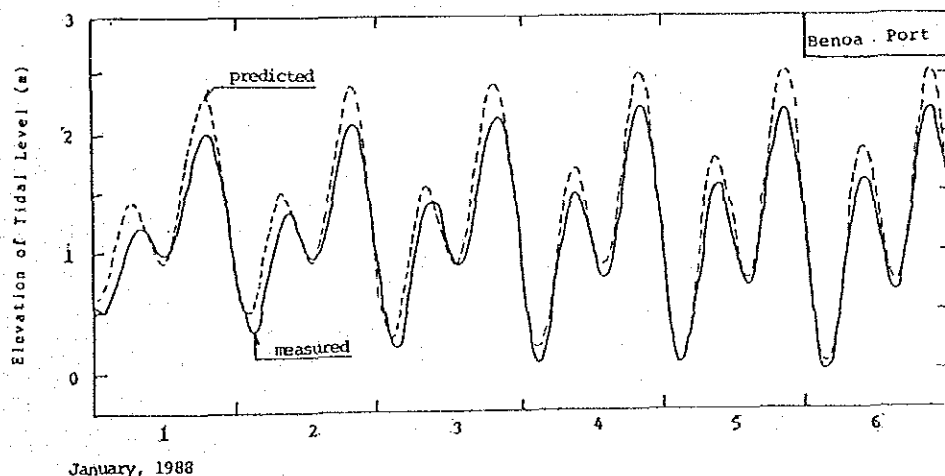


図 5-1-1-10 ベノア港における潮位変動 (1988年1月1日~6日)

表 5-1-1-2 主要四分潮

Symbol	Name of partial tides	Period in solar hours (hr:min)	Amplitude (cm)
M ₂	Principal lunar	12:25	71
S ₂	Principal solar	12:00	33
K ₁	Luni-solar diurnal	23:56	25
O ₁	Principal lunar diurnal	25:49	12

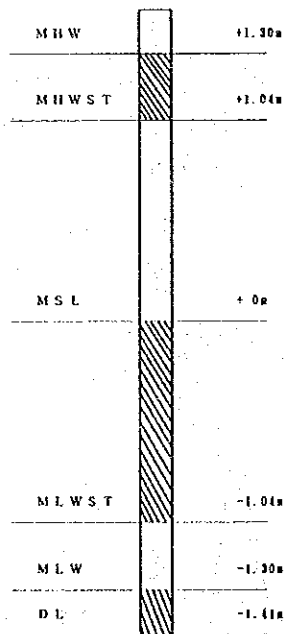
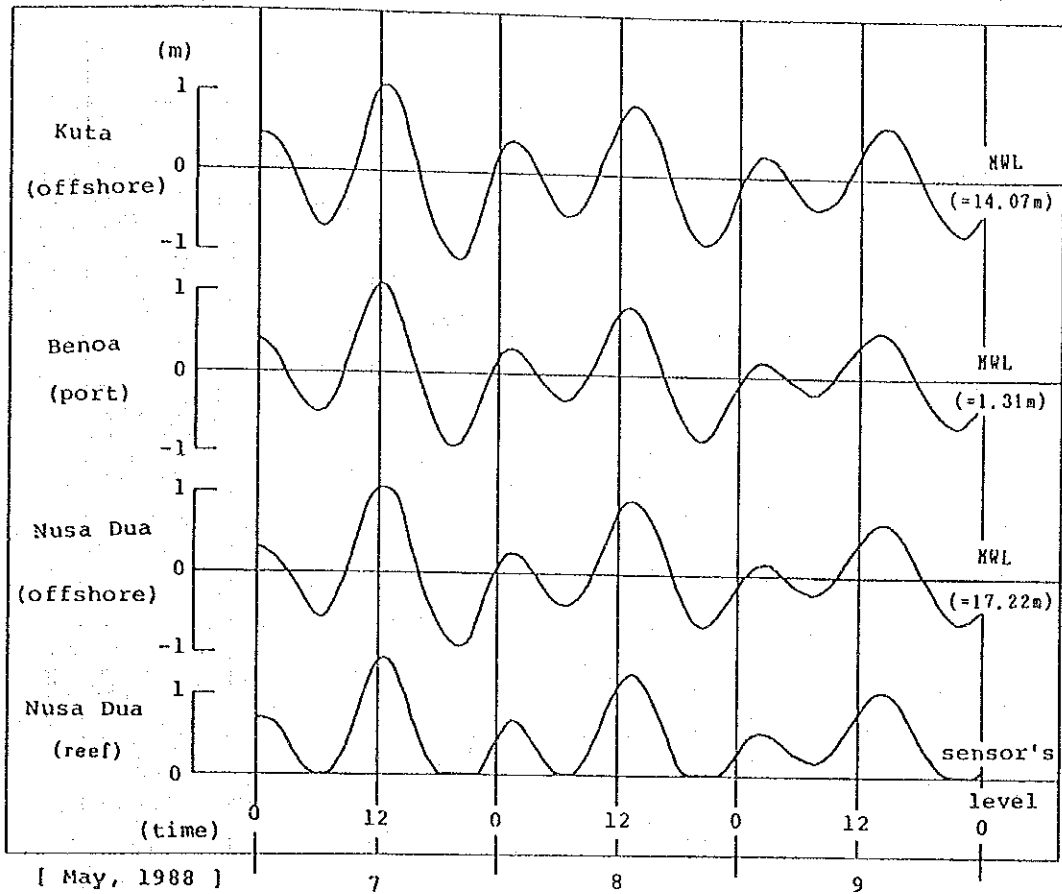
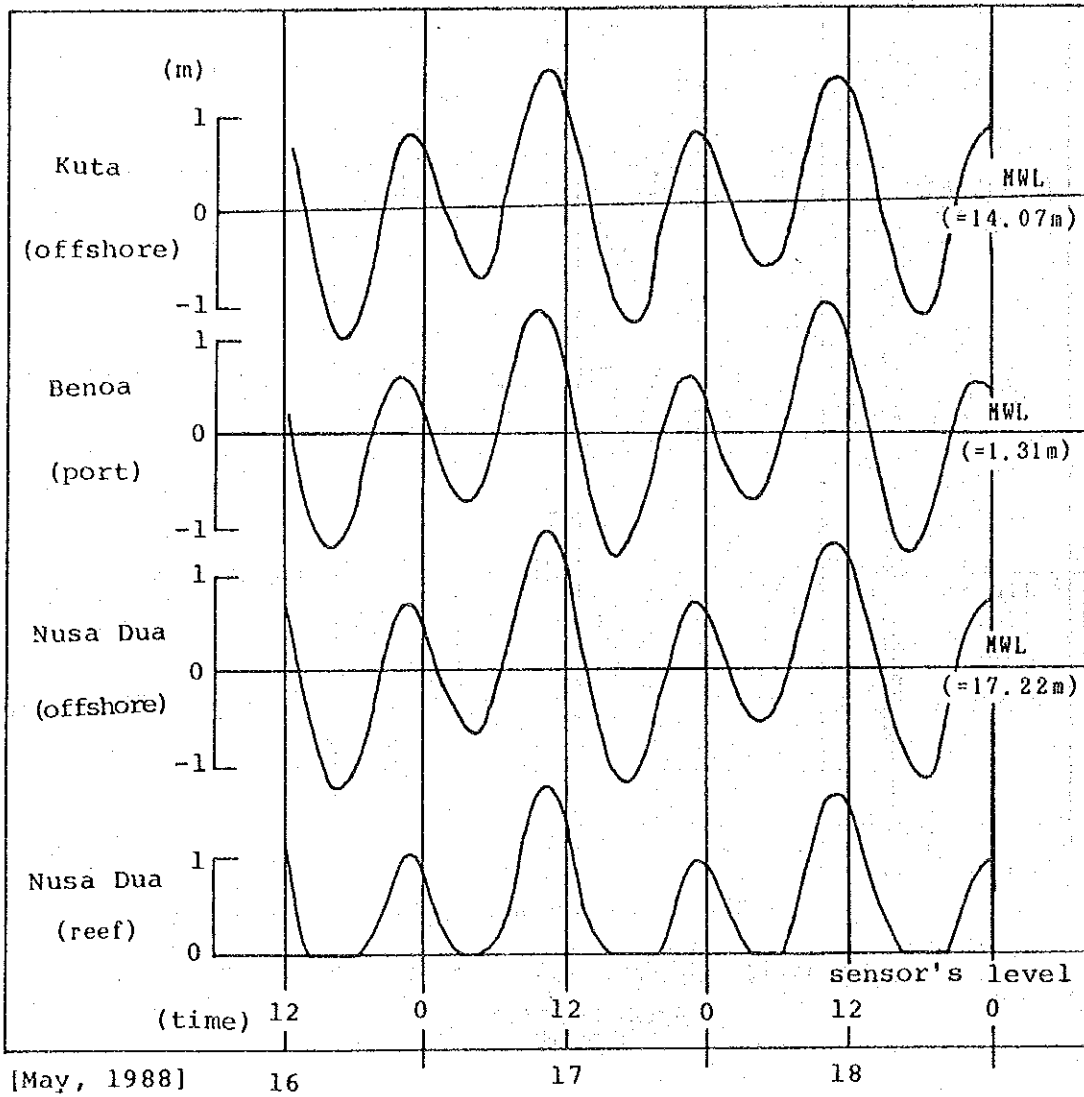


图 5-1-1-11 潮位基准面



*) MWL is the average depth of the above wave gauges.

図 5-1-1-12(1) 波高計によって実測された平均水位とベノア港の
予測潮位変動の比較



*) MWL is the average depth above wave gauges.

図 5-1-1-12(2) 波高計によって実測された平均水位とベノア港の
予測潮位変動の比較

5-1-2 二次元水路による実験

長さ30m、幅0.5m、高さ0.8mの造波水路でリーフ上の波浪減衰と平均水位の上昇の予備的検討を行った(図5-1-2-1参照)。波高、周期、平均水位を測定するために、リーフ上とのその沖合に波高計を設置した。次に、水位、リーフ・エッジの幅、沖波波高と周期を各種変化させ、代表的地形断面に対する縮尺1/50の実験を行った。地形断面はリーフ・エッジの天端高をMSL-1mに(現地スケール)、リーフ上の水深をMSL-2mと一定に(現地スケール)、リーフ沖合勾配を1/15と設定されている(図5-1-2-1)。

測定結果を表5-1-2-1にまとめた。但し、個々の諸元の値はフルードの相似則に従って、現地換算されている。さらに、表中に測定値を用いて算出した関係諸量も載せてある。例えば、No.1のケースは、沖波周期15秒、リーフ・エッジ幅10m、初期水位MSL+1.3mの条件で、沖波波高を2m、3m、4m、5mと各々変化させたケースである。精度の良いデータを得るために、沖波を測定すると共に、リーフ・エッジから岸側へ50m、100m、150m、250m、350m、450m離れたリーフ上の各地点で波を計測した。

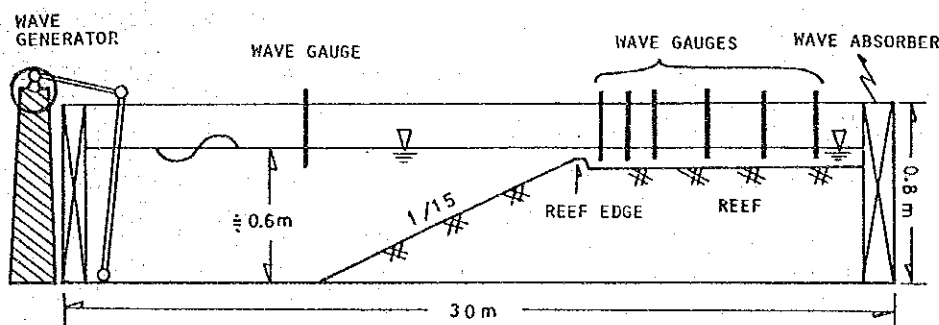


図 5-1-2-1 実験装置の模式図

図5-1-2-2は各地点の典型的な波形記録である(ケースNo.1; $H_0 = 4.87\text{m}$ 、 $T_0 = 15.6\text{秒}$)。この記録から、規則的な沖波がリーフ・エッジから岸側に近づくに従って波高が減衰し、周期が短くなる状況が読み取れる。

図5-1-2-3は岸沖方向の波高と周期の変動例である。リーフ斜面に波が近づくと浅水効果によって波高が増大し、リーフ・エッジの少し沖合側の限界水深地点で碎波する。破波した波はそのエネルギーの多くを失うために波高が大きく減少する。一方、周期は沖波周期と比較すると岸側領域で低下している。

次に、浅いリーフの存在による波浪変化特性について実験結果を基に検討する。周期の変化比の相対水深に対する関係を図5-1-2-4に示した。図5-1-2-4と図5-1-1-6を比べると、実験によって得られたデータと現地で得られたデータの両方とも全んど同様な分布を示している。従って、沖波周期に比べ短周期の波が実験と同様に現地においても再生されていると考えられる。

図 5-1-2-5は沖波波高に対するリーフ上の波高を示したものである。いずれのケースにおいても、沖波波高の増加に従いリーフ上の波高も増加する傾向が認められる。ケースNo. 1とNo. 2とを比較すると、水位の上昇に従ってリーフ上の波高も増加することがわかる。さらに、ケースNo. 2とリーフ上を掘削したケースNo. 13を比べると、リーフ上の底質掘削はリーフ上の波高を増大させるので、望ましくないことが理解される。

図 5-1-2-6は波高比と相対水深との関係を示したものであり、図中に示されている直線は図 5-1-1-7の現地データから得られた回帰直線である。現地データから得られた直線と実験データとの間には若干の傾向の相違が認められるが、全体としては互いに良く一致していると言えよう。図 5-1-2-7はリーフ・エッチ幅 (B) の効果を示したものであり、ケースNo. 1 (B = 10m)、No. 10 (B = 30m)、No. 11 (B = 50m) の実験結果が対比されている。図示の如く、リーフエッチ幅が広いとリーフ上の波高減衰の効果のあることがわかる。

図 5-1-2-8は沖波波高に対する平均水位の上昇量を示したものであり、沖波波高の増加に伴ない、平均水位も次第に増加することがわかる。平均水位の上昇量は現地実測値と比べるとかなり大きな値を示しており、沖波波高 2.5 m の同一条件下において、現地では最大約 0.1 m の上昇であるのに対して、実験では最大約 0.7 m の上昇量となっている。この二次元実験に出現した極端な水位上昇はリーフ上の水が側壁の存在のために横方向へ逃げられないために生じたものと考えられる。

図 5-1-2-9には相対水深に対する相対水位上昇量の関係が示されている。現地データ (図 5-1-1-8~9) と比較すると、実験値は現地のものより大きい。従って、水位上昇量に関しては、平面実験によって確認する必要がある。

表 5-1-2-1 二次元水路実験の結果

Case (No. T-B)	Water Level (MSL+)	Offshore Wave H_0 (T ₀)	Wave Steepness H_0/L_0	Position from Reef Edge							Mean wave at Reef \bar{H} (T)	Set-up η	Depth of Reef h	Ratio		
				50m										\bar{H}/H_0	$\bar{\eta}/T_0$	h/H_0
				50m	100m	150m	250m	350m	450m							
1-15-10	+1.3m	2.05(15.0)	0.006	1.59(13.3)	1.23(10.9)	1.20(10.5)	1.23(10.4)	0.95(11.7)	1.12(10.9)	0.38	3.58	0.55	0.73	0.19	1.80	
		3.07(15.2)	0.009	1.61(15.3)	1.45(13.3)	1.26(9.3)	1.18(10.6)	1.15(11.4)	1.19(10.4)	0.54	3.84	0.39	0.68	0.18	1.85	
		4.13(14.9)	0.012	1.78(15.3)	1.60(12.8)	1.32(10.7)	1.44(10.8)	1.24(12.6)	1.33(11.4)	0.70	4.00	0.32	0.77	0.17	0.97	
2-15-10	+0.8m	4.87(15.6)	0.013	1.90(15.1)	1.55(12.8)	1.43(10.2)	1.44(10.6)	1.43(10.9)	1.43(10.6)	0.84	4.14	0.29	0.68	0.17	0.85	
		1.76(15.4)	0.005	1.13(15.4)	1.08(12.7)	1.02(9.9)	0.95(8.9)	0.80(9.6)	0.92(9.5)	0.57	3.27	0.52	0.62	0.32	1.86	
		2.87(15.2)	0.008	1.40(15.5)	1.30(15.6)	1.24(14.0)	1.13(9.5)	0.93(10.2)	1.06(9.9)	0.67	3.47	0.37	0.65	0.23	1.21	
3-15-10	+0.3m	3.82(15.4)	0.010	1.35(15.7)	1.33(14.6)	1.13(10.1)	1.09(10.1)	1.05(9.7)	1.09(10.0)	0.83	3.63	0.29	0.65	0.22	0.95	
		4.96(15.2)	0.014	1.32(16.1)	1.31(15.4)	1.27(12.1)	1.17(10.9)	1.23(11.0)	1.22(11.3)	1.11	3.91	0.25	0.74	0.22	0.79	
		3.09(15.3)	0.008	—	—	—	—	0.97(9.7)	0.85(8.1)	0.94(9.5)	0.68	2.98	0.30	0.62	0.22	0.96
4-15-10	+0.0m	5.33(15.1)	0.015	1.55(16.3)	1.51(15.0)	1.21(12.1)	1.19(10.5)	1.17(9.1)	1.19(10.6)	0.94	3.24	0.22	0.70	0.18	0.51	
		3.10(15.3)	0.008	—	—	—	—	0.77(8.8)	0.72(8.6)	0.77(9.5)	0.77	2.77	0.25	0.62	0.25	0.89
		5.12(15.0)	0.015	1.33(15.6)	1.28(14.6)	1.14(13.1)	0.99(9.4)	0.93(8.6)	1.02(10.4)	0.96	2.96	0.20	0.69	0.19	0.58	
5-15-10	-0.5m	2.96(14.9)	0.009	—	—	—	—	0.70(9.6)	0.59(8.2)	0.47(7.3)	0.59(8.4)	0.20	0.56	0.22	0.73	
		3.01(14.8)	0.009	—	—	—	—	0.46(12.1)	0.39(7.6)	0.25(7.5)	0.37(9.1)	0.45	0.12	0.61	0.15	0.48
		5.29(12.4)	0.022	1.74(12.9)	1.79(13.0)	1.53(11.7)	1.38(13.0)	1.45(12.5)	1.45(12.4)	0.76	4.06	0.27	1.00	0.14	0.77	
6-15-10	+0.8m	5.48(12.3)	0.023	1.67(12.4)	1.69(12.5)	1.44(10.8)	1.43(11.8)	1.44(11.9)	1.44(11.5)	0.85	3.66	0.26	0.93	0.16	0.67	
		5.16(12.3)	0.022	1.50(12.9)	1.37(11.7)	1.21(11.1)	1.16(11.0)	1.07(12.1)	1.15(11.4)	0.89	3.19	0.22	0.93	0.17	0.52	
		1.80(15.0)	0.005	1.06(15.1)	0.85(11.5)	0.87(9.6)	0.97(8.9)	0.77(9.4)	0.87(9.3)	0.47	3.27	0.48	0.62	0.26	1.82	
7-12-10	+0.8m	2.64(15.3)	0.007	1.46(14.6)	1.36(13.5)	1.11(9.6)	1.10(9.6)	1.01(10.3)	1.07(9.9)	0.61	3.41	0.41	0.65	0.23	1.29	
		3.44(15.3)	0.009	1.51(15.9)	1.53(13.4)	1.36(9.5)	1.20(9.6)	1.17(10.4)	1.24(9.8)	0.78	3.58	0.36	0.64	0.23	1.04	
		4.52(15.4)	0.012	1.65(16.2)	1.67(14.0)	1.34(11.1)	1.25(9.7)	1.32(10.7)	1.30(10.5)	0.98	3.78	0.28	0.68	0.22	0.84	
8-12-10	+0.3m	1.72(15.5)	0.005	1.06(16.0)	0.91(16.3)	0.85(11.1)	0.78(9.2)	0.69(9.4)	0.77(9.9)	0.54	3.34	0.45	0.64	0.31	1.94	
		2.77(15.3)	0.008	1.32(15.8)	1.20(14.6)	1.06(10.1)	1.04(9.9)	0.91(10.1)	1.00(10.0)	0.72	3.52	0.36	0.65	0.26	1.27	
		3.63(15.3)	0.010	1.45(15.9)	1.47(13.9)	1.23(9.9)	1.09(9.3)	1.11(10.5)	1.14(9.9)	0.87	3.67	0.31	0.65	0.24	1.01	
9-12-10	+0.8m	4.58(15.6)	0.012	1.60(16.6)	1.60(15.6)	1.28(11.5)	1.28(10.5)	1.26(10.7)	1.27(10.9)	0.98	3.78	0.28	0.70	0.21	0.83	
		5.17(12.1)	0.023	1.46(12.8)	1.54(13.0)	1.49(11.8)	1.11(11.4)	1.23(10.9)	1.28(11.4)	0.91	3.71	0.25	0.94	0.18	0.72	
		1.90(15.5)	0.005	1.20(14.3)	1.13(10.9)	1.20(9.8)	1.05(10.5)	1.23(9.7)	1.16(10.0)	0.41	4.21	0.61	0.65	0.22	2.22	
10-15-30 (dredged)	+0.8m	2.76(15.3)	0.008	1.72(15.4)	1.50(10.6)	1.52(10.6)	1.34(12.4)	1.29(12.3)	1.38(11.8)	0.57	4.37	0.50	0.77	0.21	1.58	
		4.04(14.1)	0.013	1.95(13.2)	1.92(12.7)	1.84(11.6)	1.66(11.1)	1.56(13.2)	1.69(12.0)	0.80	4.60	0.42	0.85	0.20	1.14	
		4.61(15.4)	0.012	2.11(16.0)	2.03(13.4)	1.83(11.0)	1.72(12.0)	1.56(12.2)	1.70(11.7)	0.89	4.69	0.37	0.76	0.19	1.02	

where, 1) No. T-B : No. is the case number, T is a representative wave period(in second) and B is the width of reef edge(in meter).

2) H, T : H is a significant wave height(in meter) and T is a significant wave period(in second).

3) \bar{H} , $\bar{\eta}$: \bar{H} and $\bar{\eta}$ are mean values of 250m, 350m and 450m position with wave height and period, respectively.

4) η : Wave set-up height averaged all over the reef (in meter).

5) h : Water depth on the reef including set-up height(in meter).

6) Water Level : The water level is initially set before generating waves.

7) Reef : The crown of reef edge is in high on the flat inner reef and the crown level is 1m below MSL and the depth of inner reef is 3m below MSL. is for dredging the inner reef ; the crown height is 1m below MSL and the depth of inner reef is 3m below MSL.

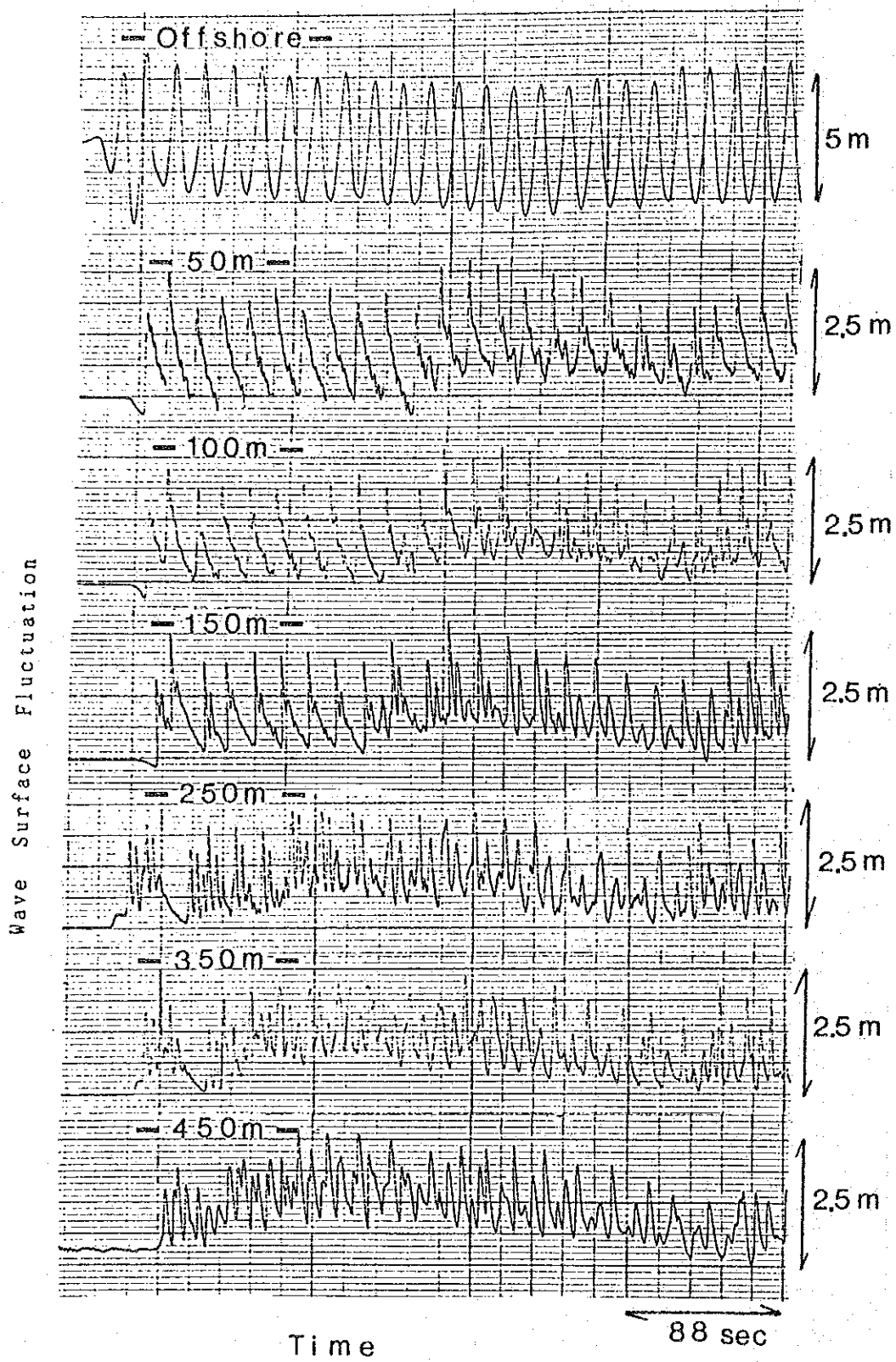


図 5-1-2-2 波形記録の例

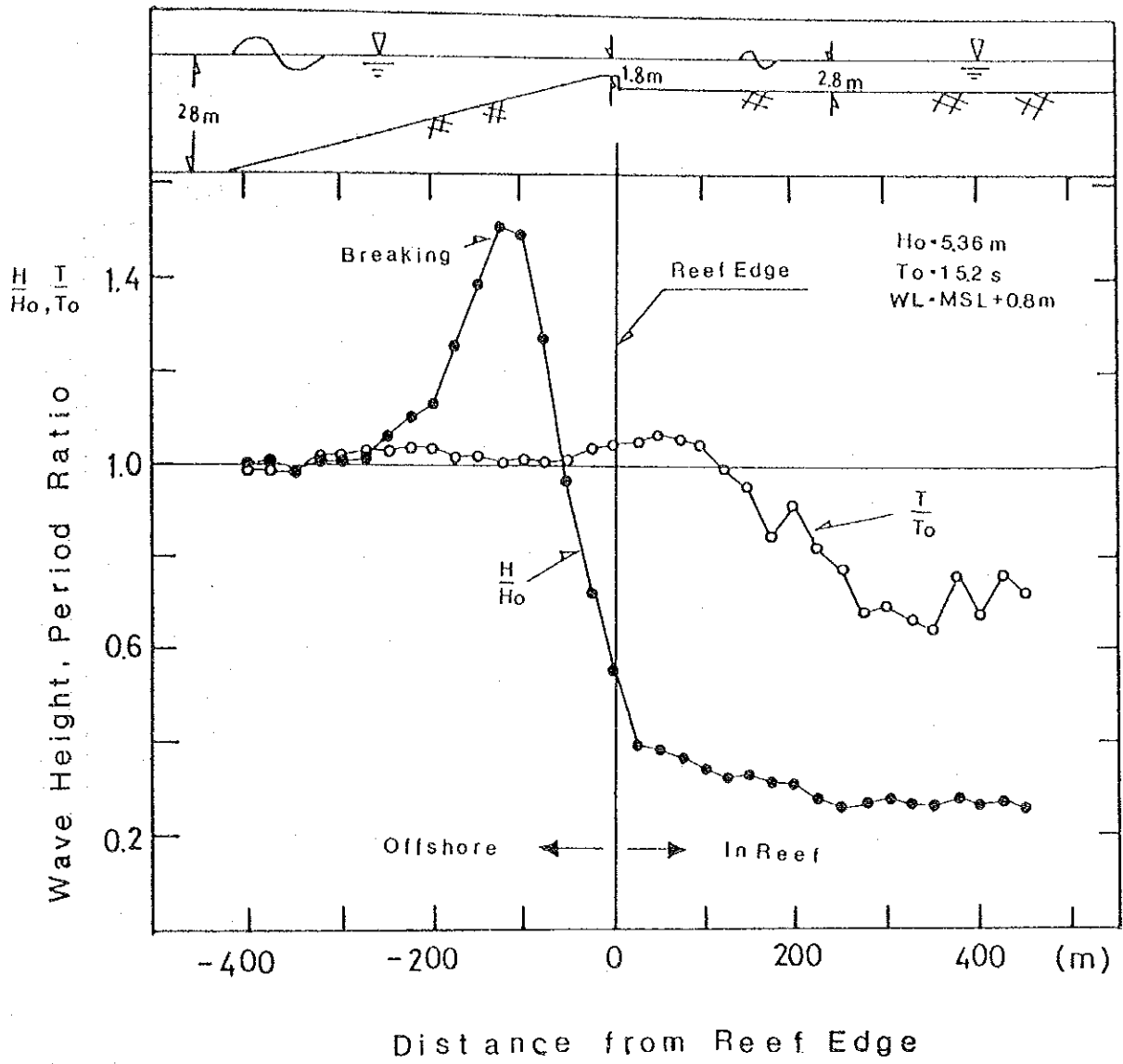


図 5-1-2-3 波高と周期の変動

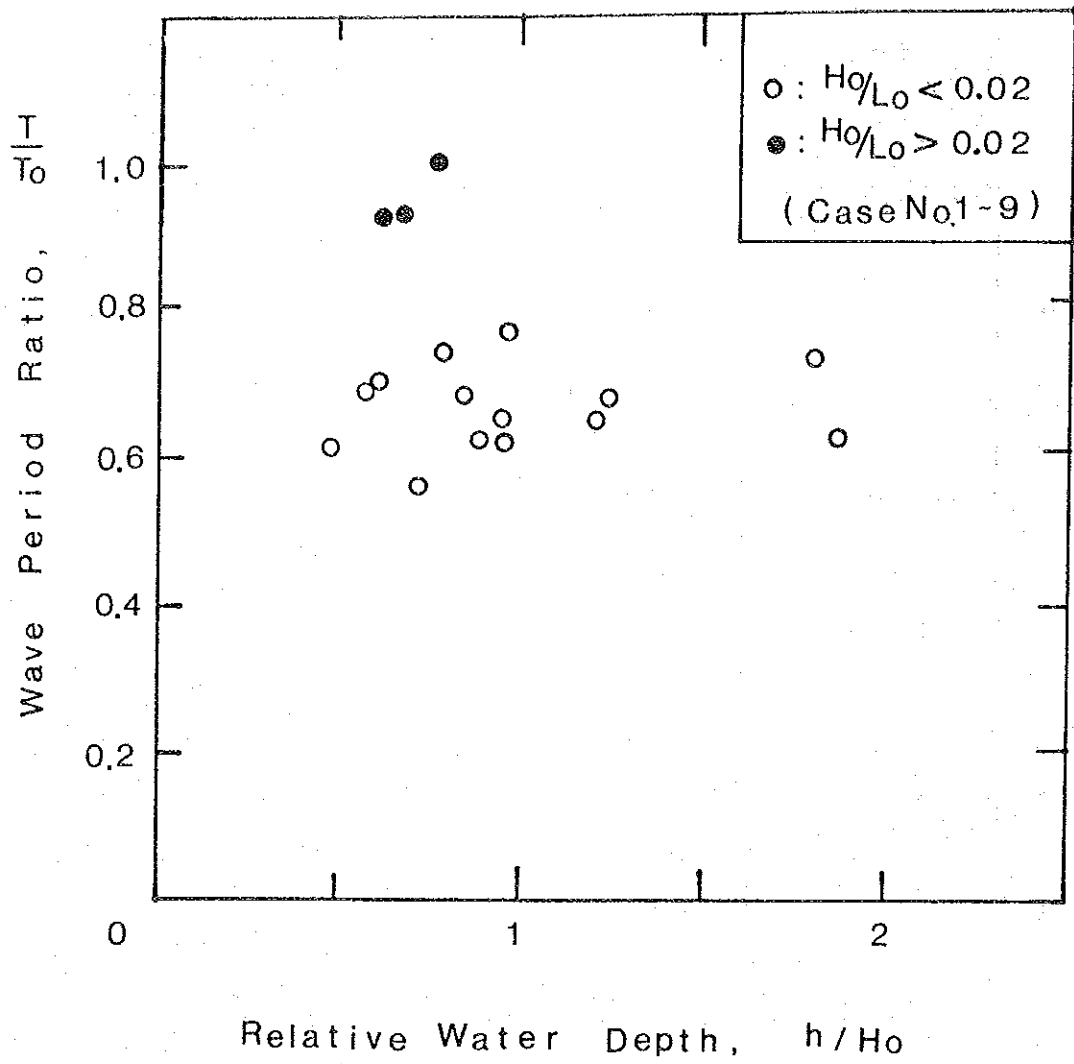


図 5-1-2-4 周期比と相対水深の関係

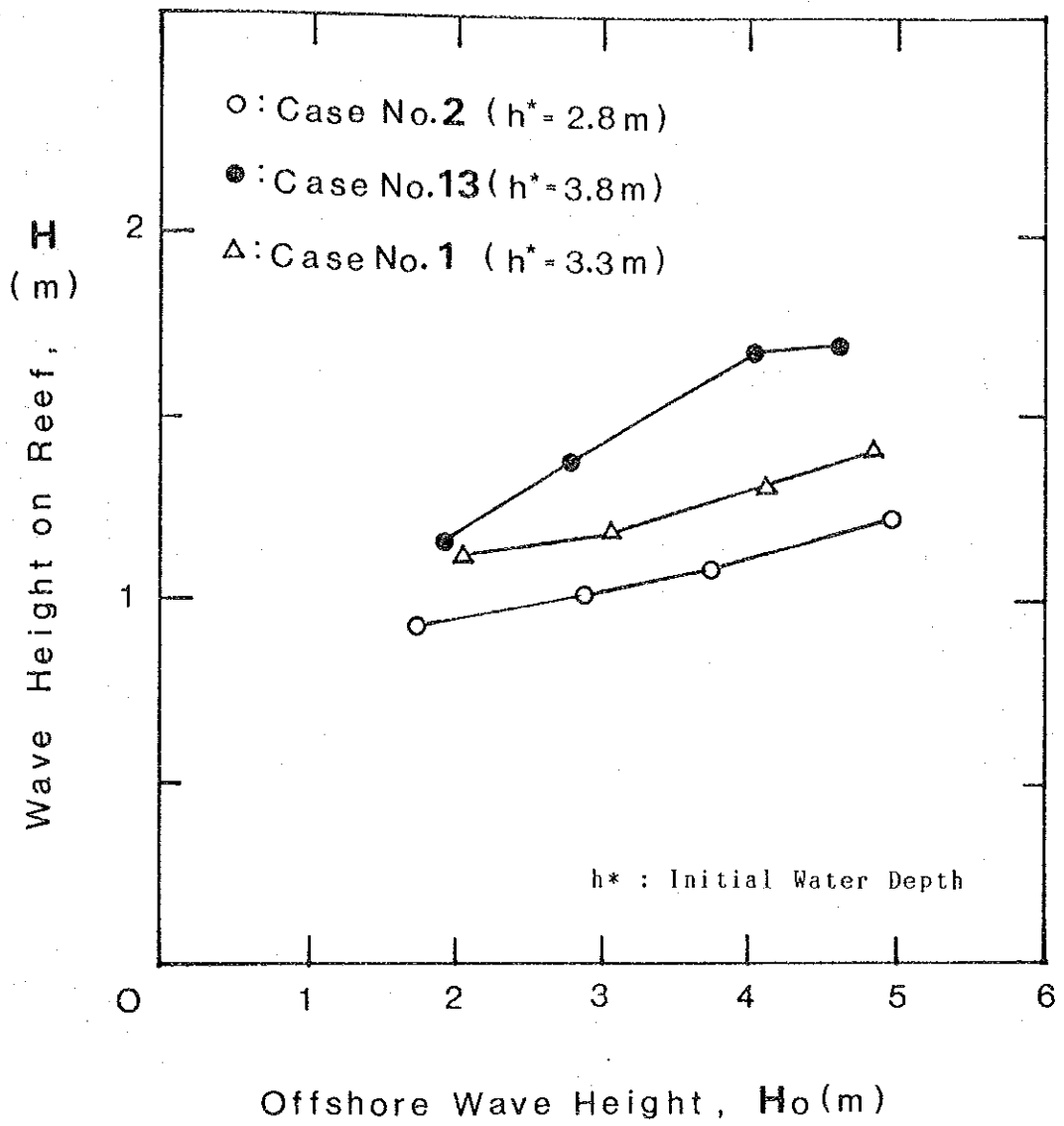


図 5-1-2-5 沖波波高に対するリーフ上の波高変動

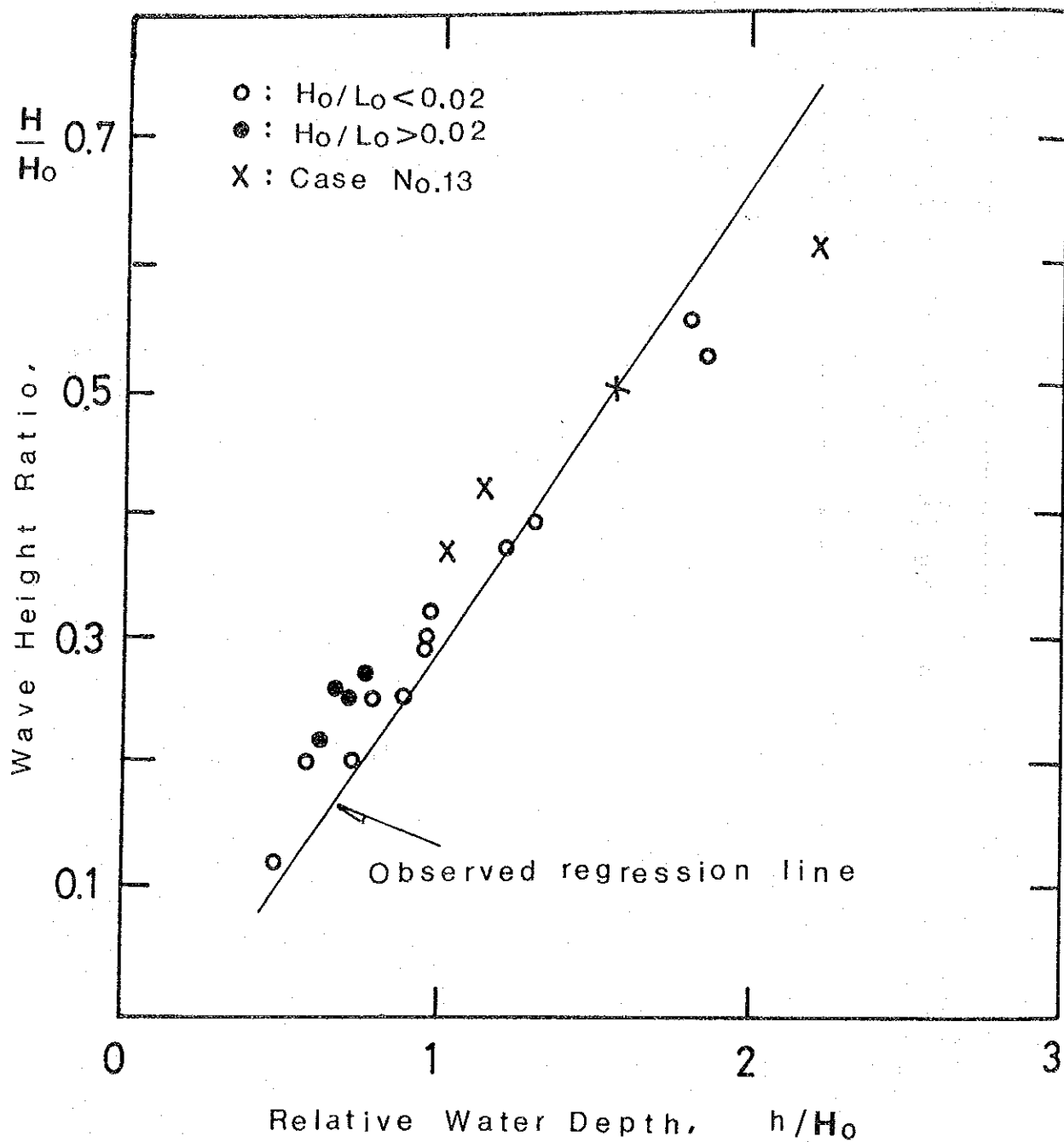


図 5-1-2-6 波高比と相対水深の関係

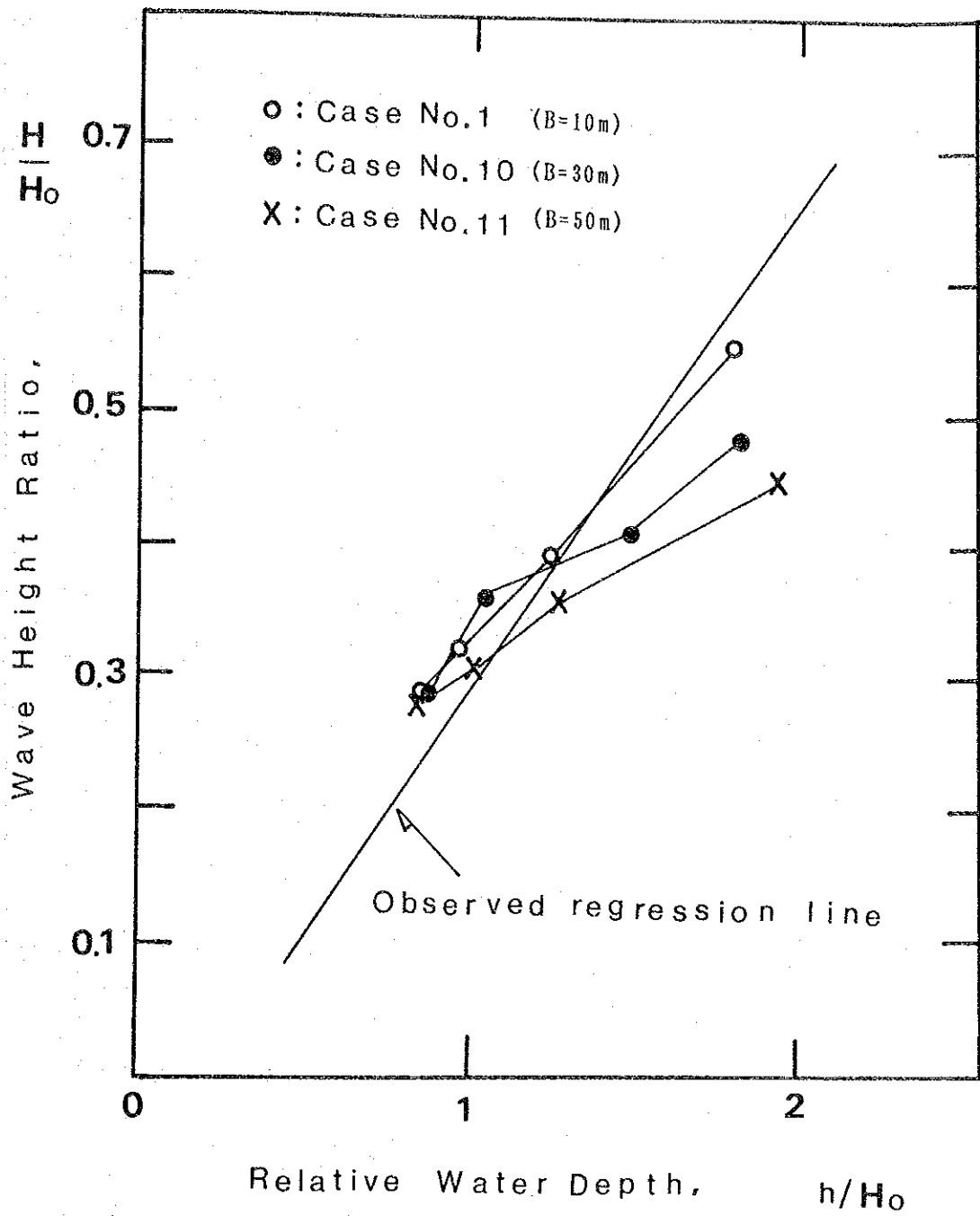


図 5-1-2-7 波高比と相対水深の関係

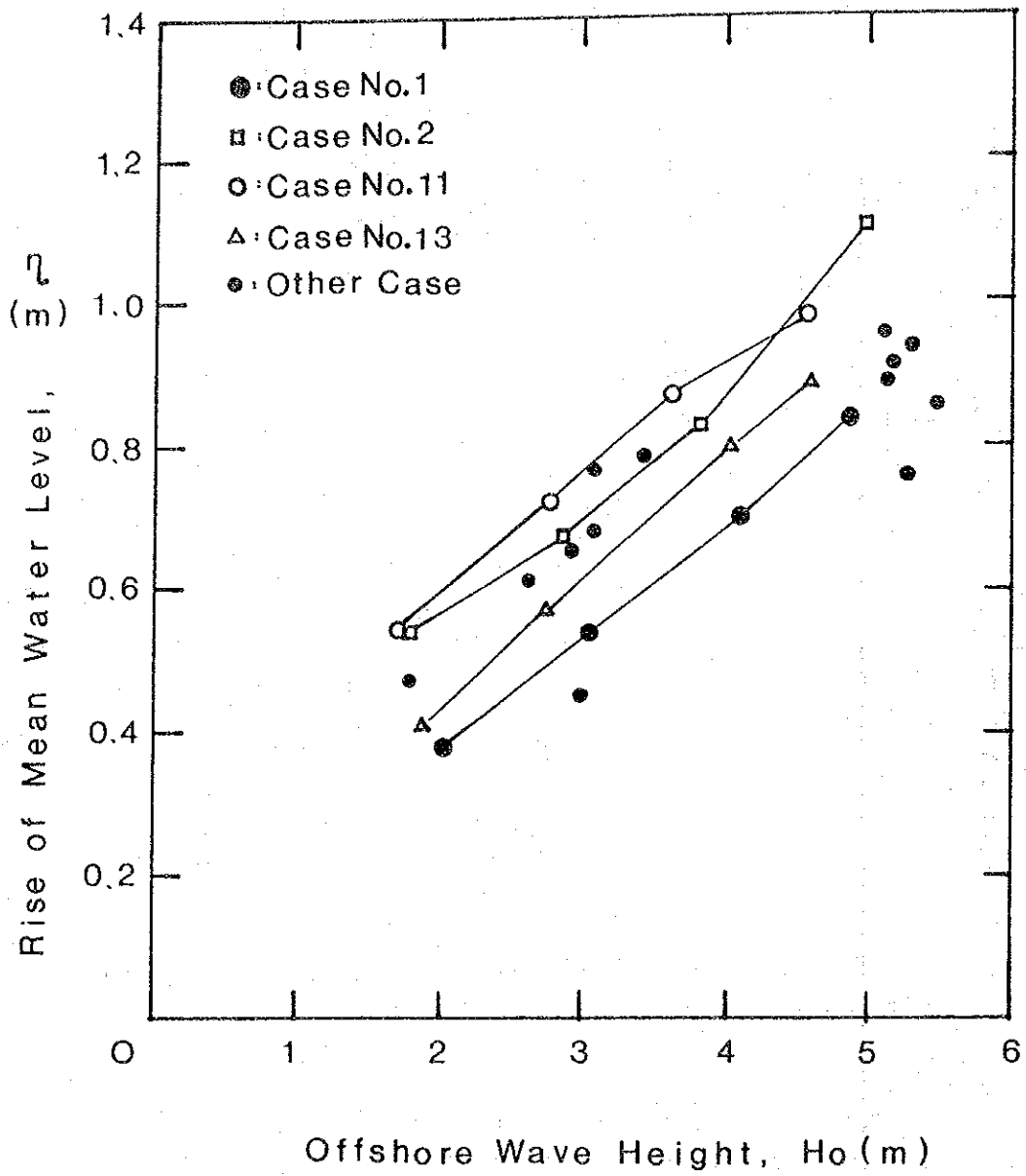


図 5-1-2-8 沖波波高に対する平均水位の変動

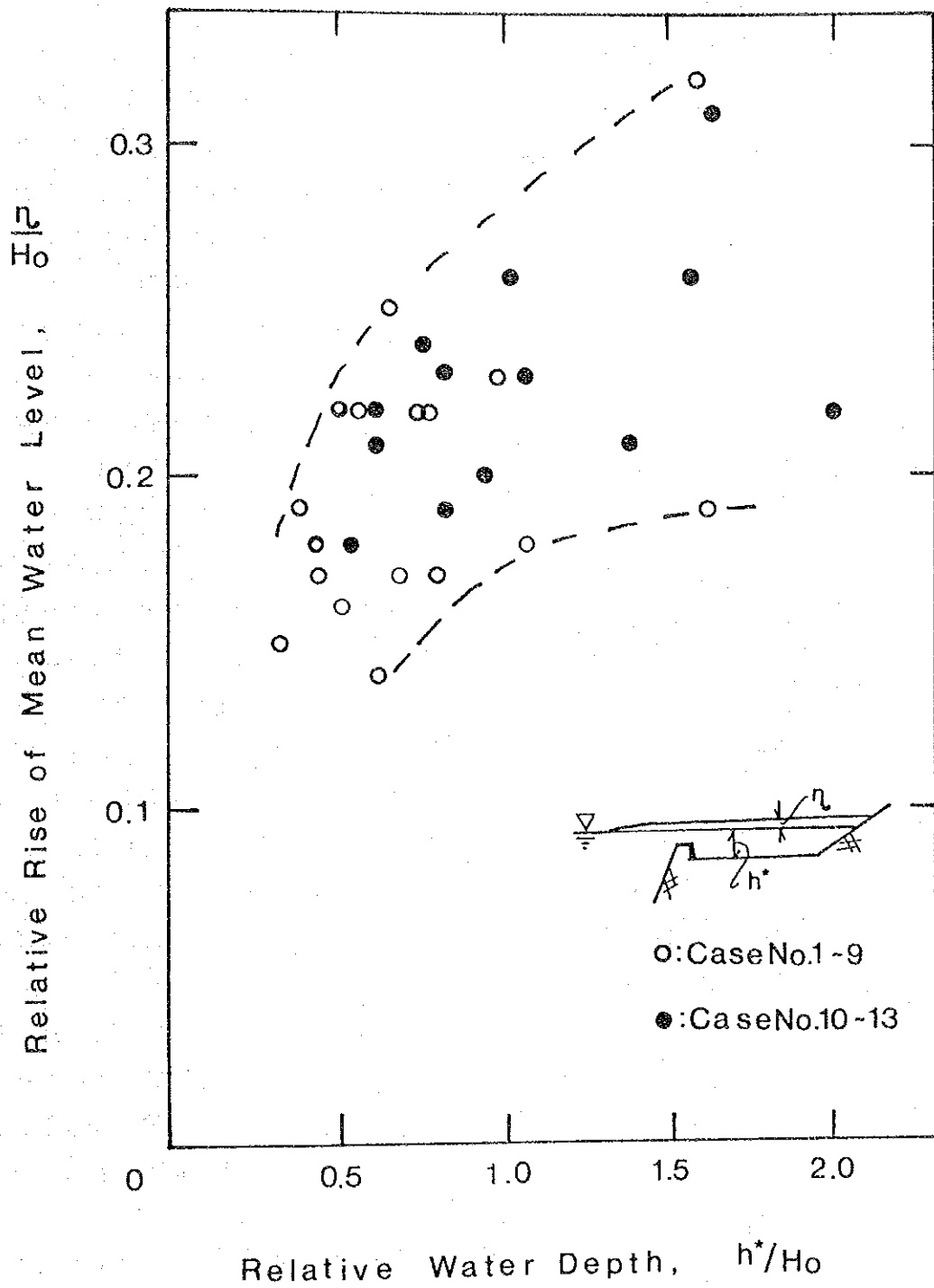


図 5-1-2-9 相対的平均水位の上昇と相対水深の関係

5-1-3 三次元水槽による実験

長さ50m、幅50m、深さ0.8mの三次元水槽を用いて図5-1-3-1に示したクタ及びヌサドゥアの各海岸のモデル地形に対する水理実験を行った。実験で用いた波は造波機前面で波高10cm、周期2.1秒の波である。模型縮尺は二次元実験と同様に1/50であるので、フルードの相似則により現地換算すると上記波は沖波波高 $H_o = 5$ m、沖波周期 $T_o = 15$ 秒に相当する。一方、沖波波向はクタ・ビーチの卓越波向SWとヌサドゥア・ビーチの卓越波向SEの屈折計算結果に基づき、現地換算で水深20m地点の波向を造波機前面で与えた。さらに、初期水位はMHW (MSL + 1.3m) で与えている。以下においては、相似則により実験計測値は全て現地スケールに換算されている。クタ及びヌサドゥア・ビーチの現況及び対策工に対する実験結果を以下に述べる。

(1) クタ・ビーチ

1) 現況

リーフ上も含めた浅海域の波高分布を図5-1-3-2に示した。この結果より、2m未満の波高がリーフ帯の南側海域に出現しているが、比較的大きな波はサンゴ礁の発達していない北側海域に生じている。このことは、波の来襲に対してサンゴ礁が天然の防波堤の機能を果していることを物語っている。

図5-1-3-3は波の入射に伴って生じる平均水位の上昇量の分布を示したものである。南側の大部分のリーフ帯ではMWL 0.3m以上の水位上昇が生じているのに対して、北側領域でのそれは、比較的低い。この水位勾配は、水位の高い所から低い所へ水が流れることから北向きの流況を示すものである。二次元水路で観測した同一条件下の平均水位上昇量0.84mと比べると、平面水槽で測定された値は概略上記の約半分である。

図5-1-3-4は周期の分布を示している。沖波周期($T_o = 15$ 秒)と比べると、場所により長い周期の波や短い周期の波が生じている。目視観測によると、15秒より長い周期が出現している箇所は入射方向の異なる波が重なり合う場所に対応している。従って、実験で計測された長周期の波は入射波の重ね合わせによって生じるいわゆる重複波によるものと考えられる。

図5-1-3-5は波の入射によって発生する流況を示している。図示の如く、リーフ上の水はほとんど海岸線に沿って北向きに流れている。強い流れが南側リーフ帯上の沖側に認められ、その一部はリーフ帯の狭い箇所から沖合へ流出している。しかしながら、汀線近傍の流れは、このような高波浪条件下でもそれほど強くはない。

図5-1-3-6は波高の測定値と計算値との差を示したものである。ただし、計算値は現地データの回帰分析によって得られた関係式 $H = 0.37h$ (ここに、 h は平均水位上昇も含めたリーフ上の水深である) によって求めたものである。

複雑な地形形状にもかかわらず、リーフ・エッジ近くの若干の顕著な相違を除けば、波高はおおむね、互いに良く一致していると言えよう。

2) 対 策 案

図5-1-3-7は図示された如く2つのT型突堤を配置した対策案のケースについて得られた波高分布である。現況ケース(図5-1-3-2)のデータと比較すると、波高の高・低の出現特性は概略同じであるが、T型突堤の背後には明瞭な静穏域が出現している。

流況結果(図5-1-3-10)によれば、南側T型突堤の沖に発生している卓越流がリーフ帯の狭まり箇所から沖合へ流出している。波浪流によって運搬される底質を補足する突堤の効果を検討すると、リーフ帯から沖へ流出する強い流れは海浜の保全対策としては望ましい現象ではない。上記結果を踏まえ、次に代替案に対する実験を実施した。

図5-1-3-11は新たな代替案に対する流況結果であり、T型突堤を前の位置よりさらに180m南側へ移動し、2つのT型突堤の中間に直線型の突堤一基を設置したものである。図示された流速分布から判断すると、代替案のT型突堤は流況パターンに悪影響を及ぼしていない。しかし、直線型の突堤南側には沖向きの比較的強い流れが発生しているため、その形状を変更することが望まれる。

(2) ヌサドゥア・ビーチ

1) 現 況

測定結果を図5-1-3-12~15に示した。図5-1-3-12からリーフ・ギャップの周辺に波高の高い領域が出現しており、波高1m未満が分布しているのは北側海岸線と離岸堤背後の浅海域に認められる。図5-1-3-13に示された平均水位上昇の勾配から判断すると、リーフ上の卓越流向は北から南向きである。図5-1-3-15の流速ベクトルからU型離岸堤の沖側に存在するリーフ・ギャップから沖合へ強い流れの発生していることがわかる。

一方、リーフ帯内の流速は比較的小さい。

図5-1-3-15はクタ・ビーチと同様に回帰式から算出した波高と測定波高とを比較したものである。図中の正・負の分布を考慮すると、式($H=0.37h$)はリーフ帯の概略波高を推算するのに適用可能と考えられる。

2) 対 策 案

対策案に対する実験結果を各々の項目につき図5-1-3-17~20に示した。ヌサドゥア・ビーチの対策工としては、U型離岸堤を沖方向に潜堤形式で延長し、U型離岸堤近くの北側既存突堤も図示した如く沖合へ延長し、さらに、既存の離岸堤4基を撤去する案である。

波高の測定データから見ると、1 m未満の波高の波が汀線近傍の全ての領域に出現している。このような静穏な波浪条件は主としてリーフ・ギャップを通り外海から直接的に入射してくる波を阻止するU型離岸堤の延長効果によって生じたものと考えられる。また、当地点のリーフ帯に入射してくる波浪エネルギーの大部分はリーフ・ギャップを通過してくるため、既存の4基の離岸堤はU型離岸堤の延長と比べると、それほど有効とは言えない。

図5-1-3-20に見られる流況によれば、リーフ・ギャップから流出する流況パターンは現況とほぼ同じである。潜堤は底質の深海域への落ち込みを阻止でき、リーフ・ギャップから海水のみが沖合へ流出し、リーフ・エッチから越波により入ってくる新鮮な海水と交換できる効果を有するので、好ましい対策工と言えよう。

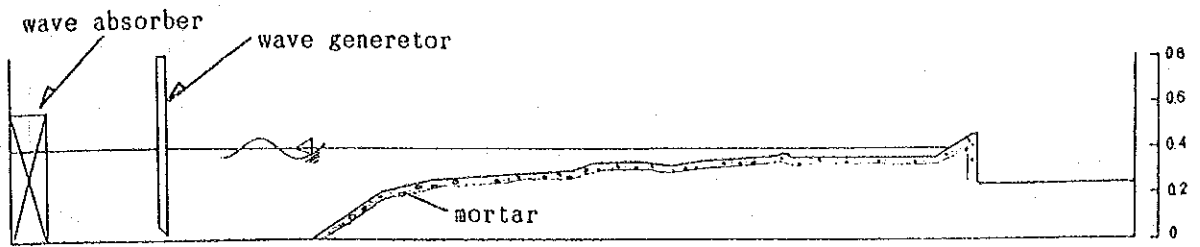
(3) 評 価

平面水槽を用いた実験によって得られた主な結果を図5-1-3-21及び22にまとめた。クタ・ビーチの波高分布によれば、T型突堤の背後は静穏域が形成され、リーフによって囲まれた砂浜同様にサンゴ礁のない浜にも砂を堆積できよう。T型突堤をリーフ上に設置する場合には、リーフ幅の狭い所に堤体を配置するのは沖向きの強い流れを発生させるので適切な配置とは言えない。従ってT型突堤の配置はリーフ幅の狭い箇所を避けてクタ・ビーチでは図5-1-3-21のC')のように設置する方が望ましい。

ヌサドゥア・ビーチの波高分布と流況から判断すると、提案された侵食保全対策案では汀線近傍に静穏域が広く形成されるので砂浜の維持に効果があると考えられる。

次に、リーフ帯に入射してくる波の砂浜への遡上高を対策案に対する実験結果に基づき検討する。クタ・ビーチの砂浜前面の測定波高 $H = 1.5$ m、ヌサドゥア・ビーチの $H = 1.0$ mと測定周期 $T = 12$ 秒とが、沖波波高と周期に各々対応すると仮定して、波の遡上高(R_u)を図5-1-3-23を用いて算出した。その結果、クタ・ビーチでは $R_u = 1.2$ m、ヌサドゥア・ビーチでは $R_u = 1.0$ mと算出された。ただし、深浅測量結果より前浜勾配を $\cot \beta = 15$ としている。クタ・ビーチの平均水位上昇量約0.4 m、ヌサドゥア・ビーチの平均水位上昇量約0.6 mとMHW (=MSL + 1.3 m) とを考慮すると、実際の前浜部に遡上する高さは両海岸ともMSL + 2.9 mとなる。従って、沖波波高 $H_o = 5$ m、 $T_o = 15$ 秒、水位 $WL = MSL + 1.3$ mという厳しい条件下で、リーフ上に入射してきた波は前浜上のMSL + 3.0 m程度まで遡上すると予想される。これより養浜の天端高は最低でもMSL + 3.0 mにすべきである。

二次元水路実験結果によれば、リーフ上の底質掘削は、リーフ上の波高を一層増大させるので悪影響を及ぼす。



Profile of A-A' section

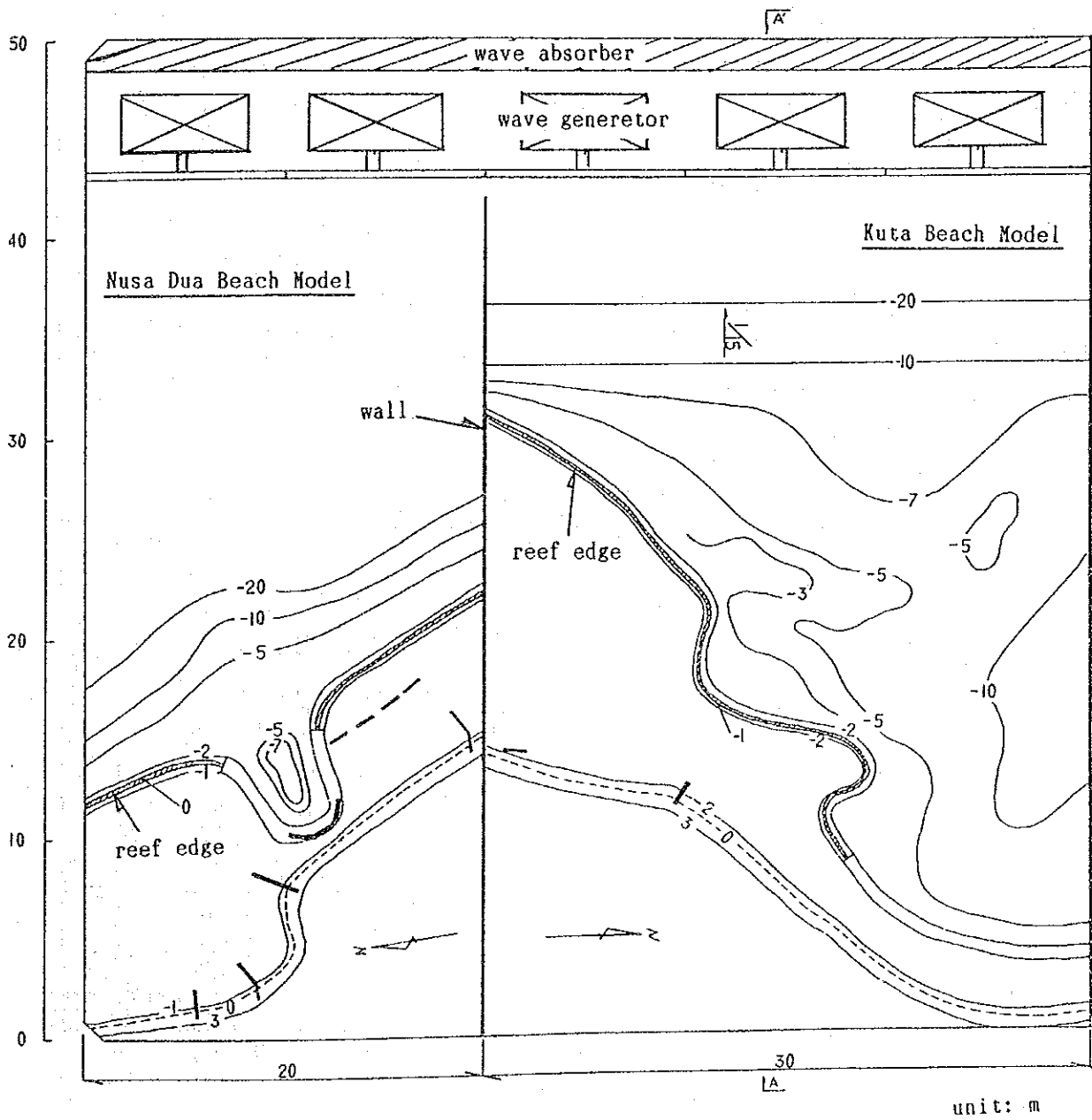


図 5-1-3-1 三次元平面水槽による実験配置図

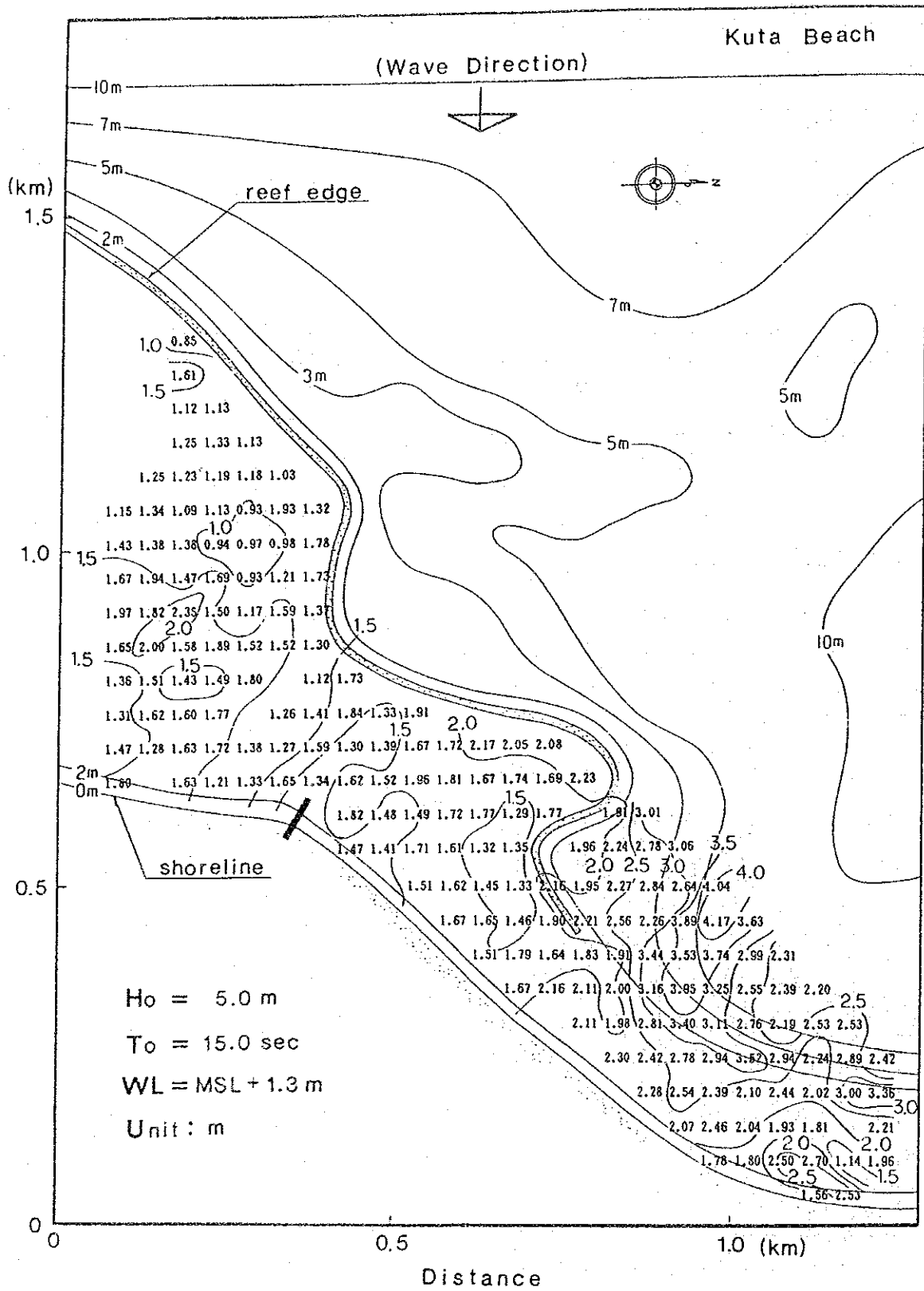


図 5-1-3-2 クタ・ビーチにおける波高分布 (現況)

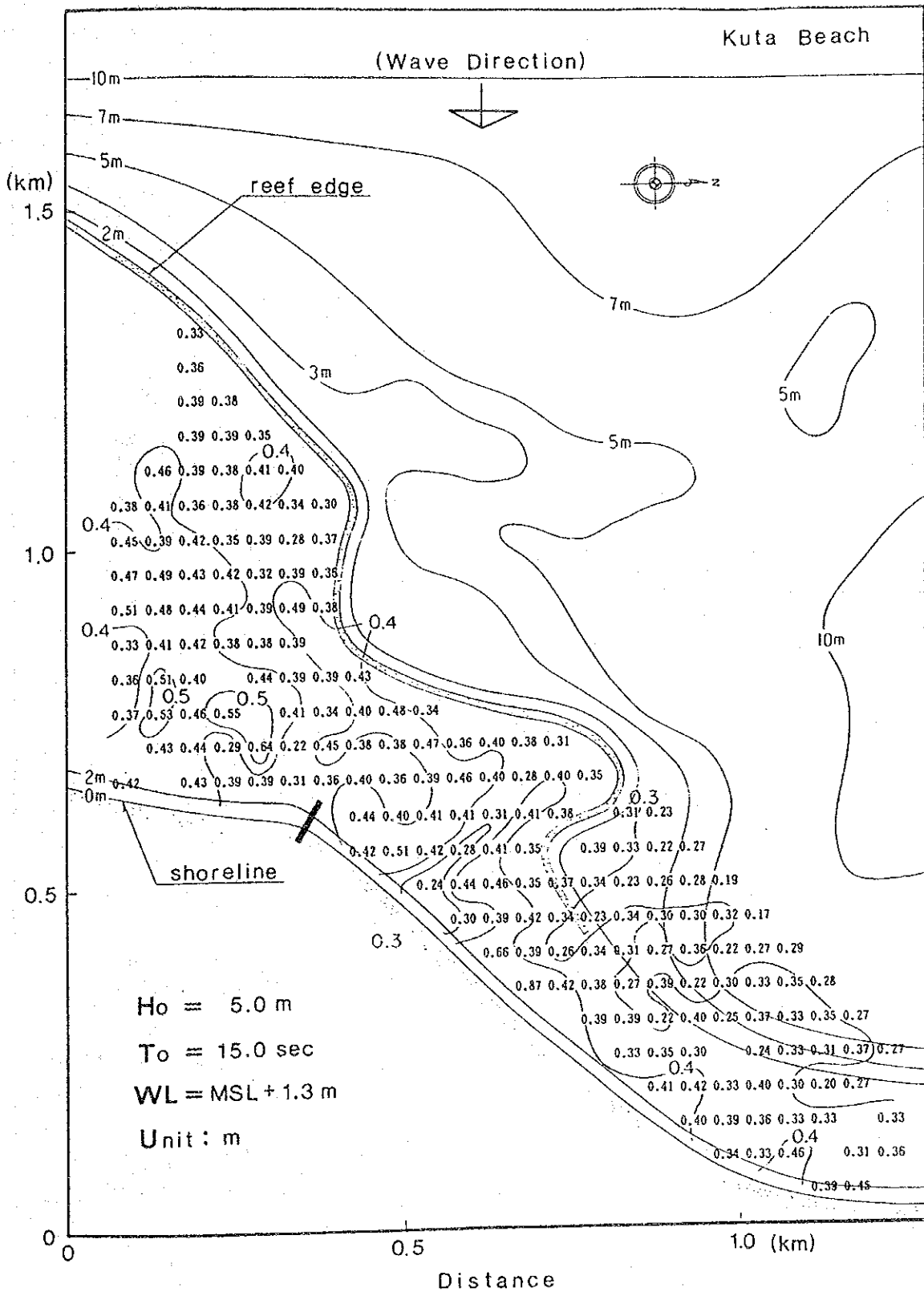


図 5-1-3-3 クタ・ビーチにおける平均水位上昇量の分布 (現況)

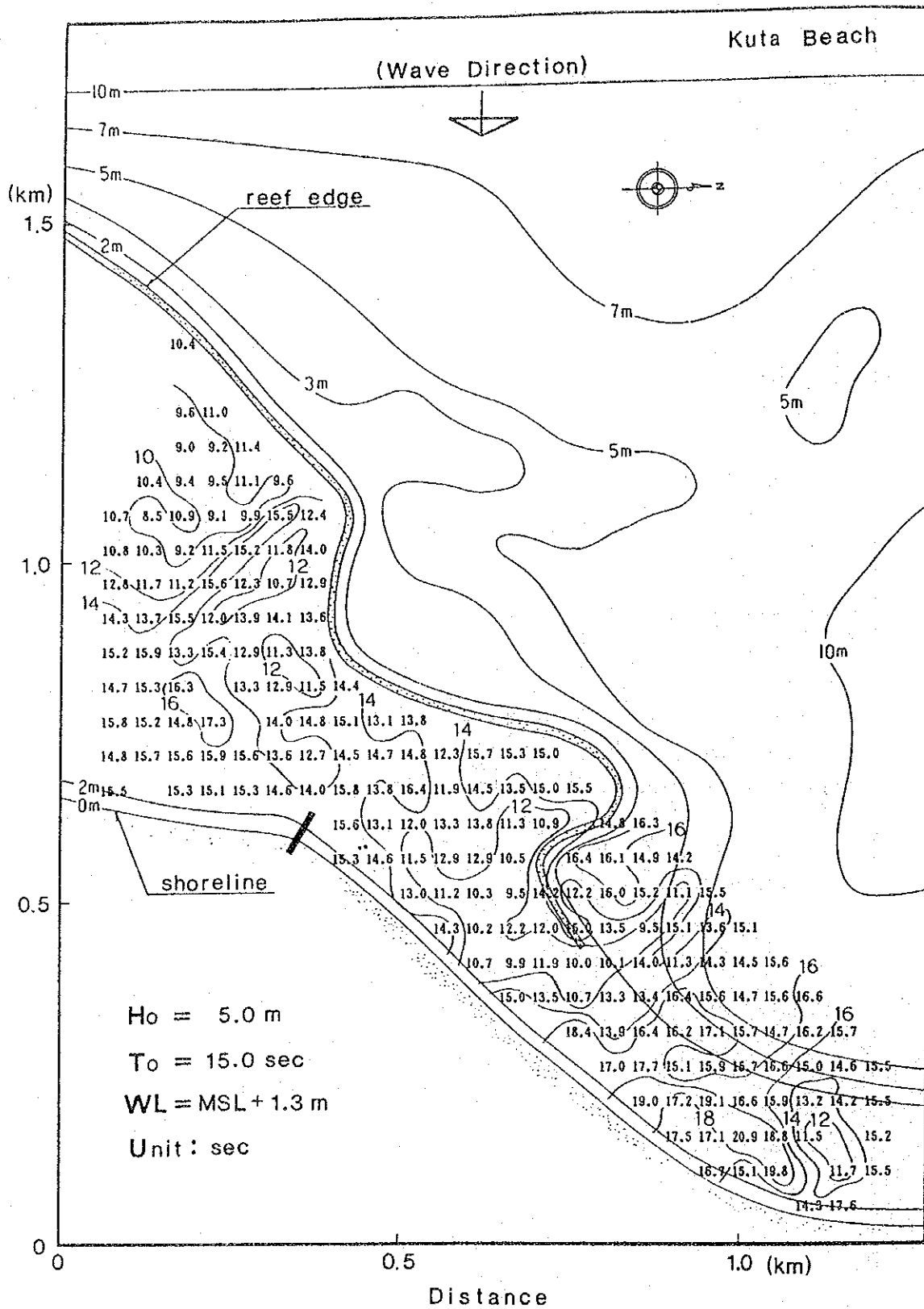


図 5-1-3-4 クタ・ビーチにおける周期分布 (現況)

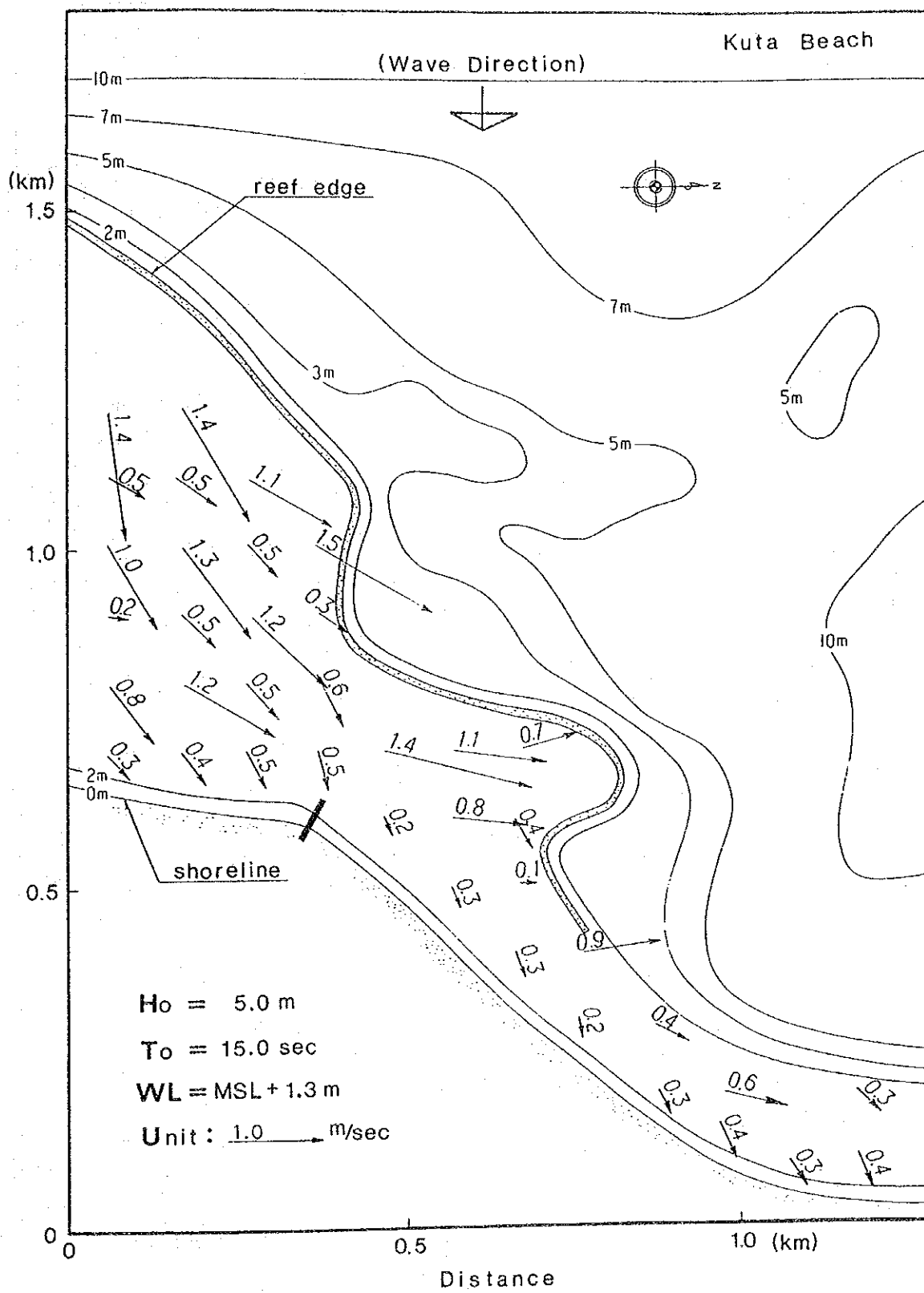


図 5-1-3-5 クタ・ビーチにおける流況 (現況)

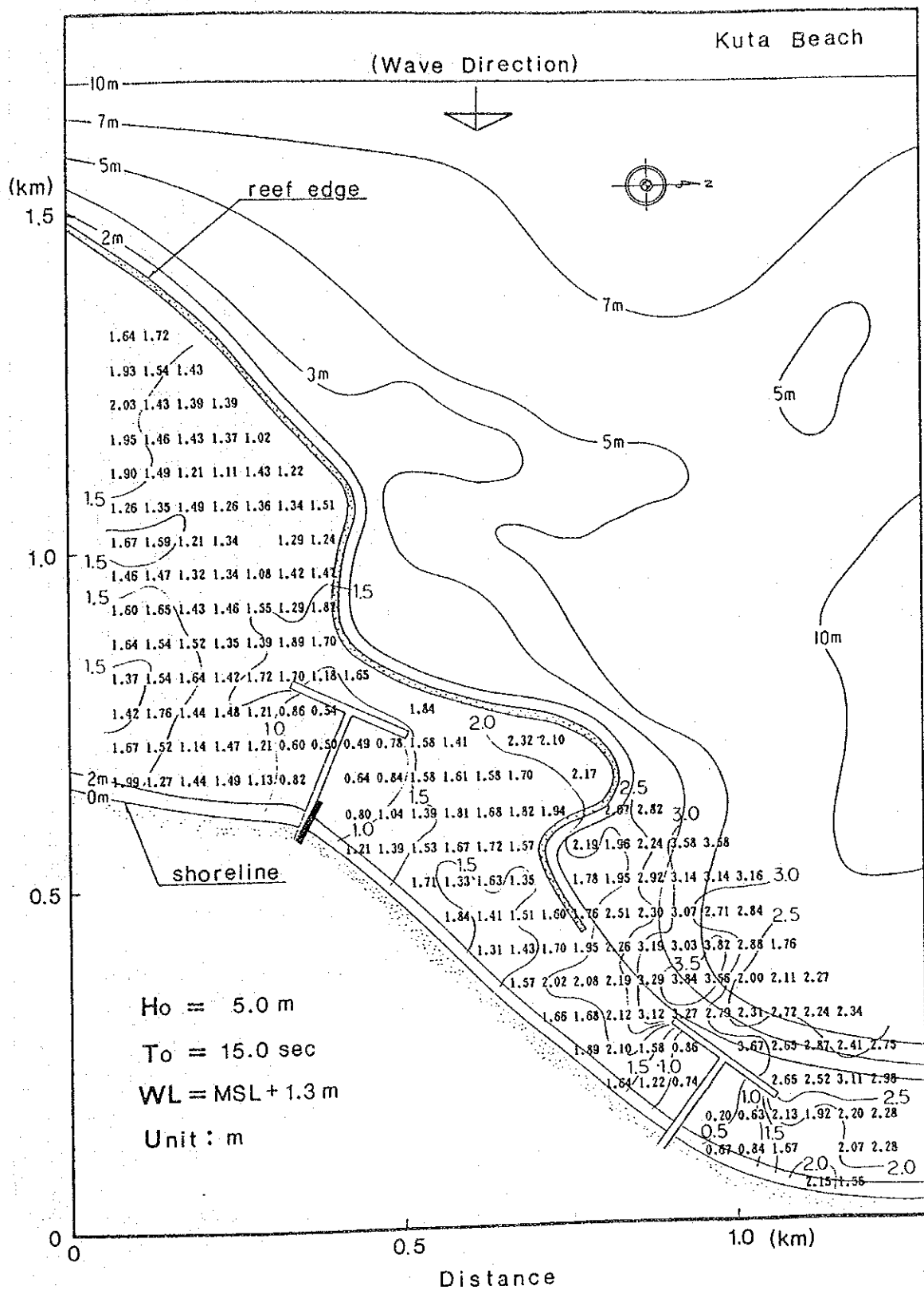


図 5-1-3-7 クタ・ビーチにおける波高分布 (対策工)

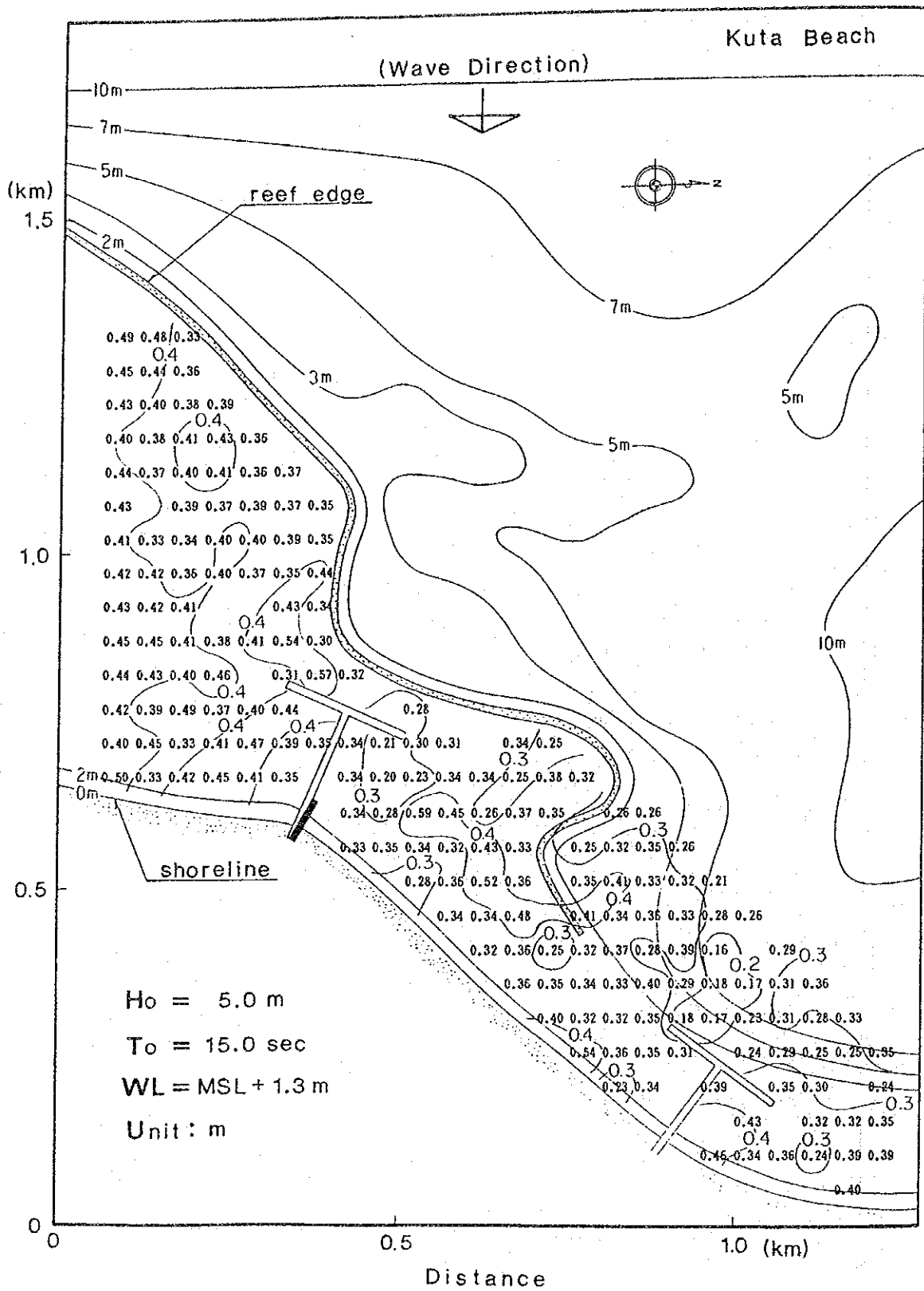


図 5-1-3-8 クタ・ビーチにおける平均水位上昇量の分布 (対策工)

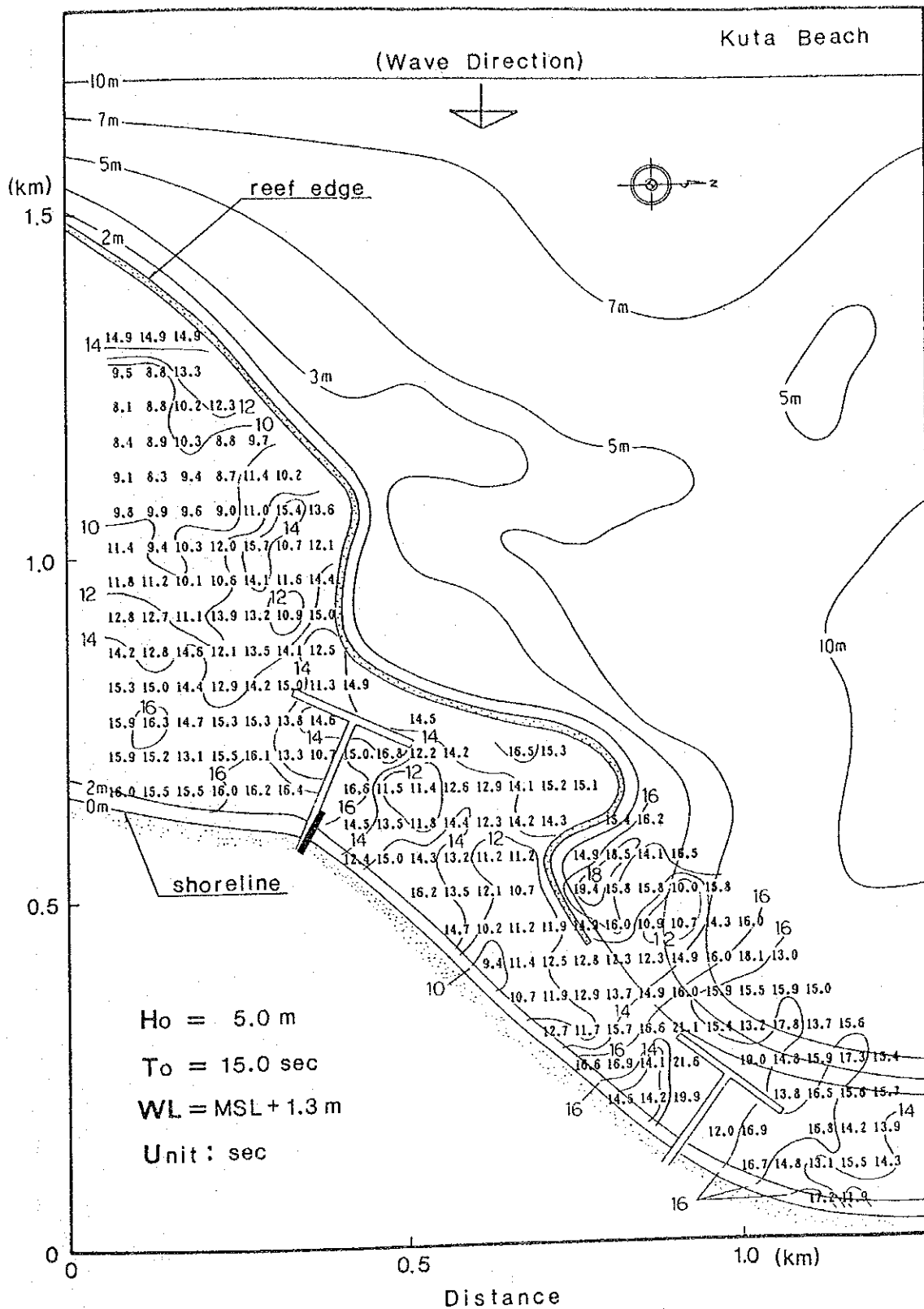


図 5-1-3-9 クタ・ビーチにおける周期分布 (対策工)

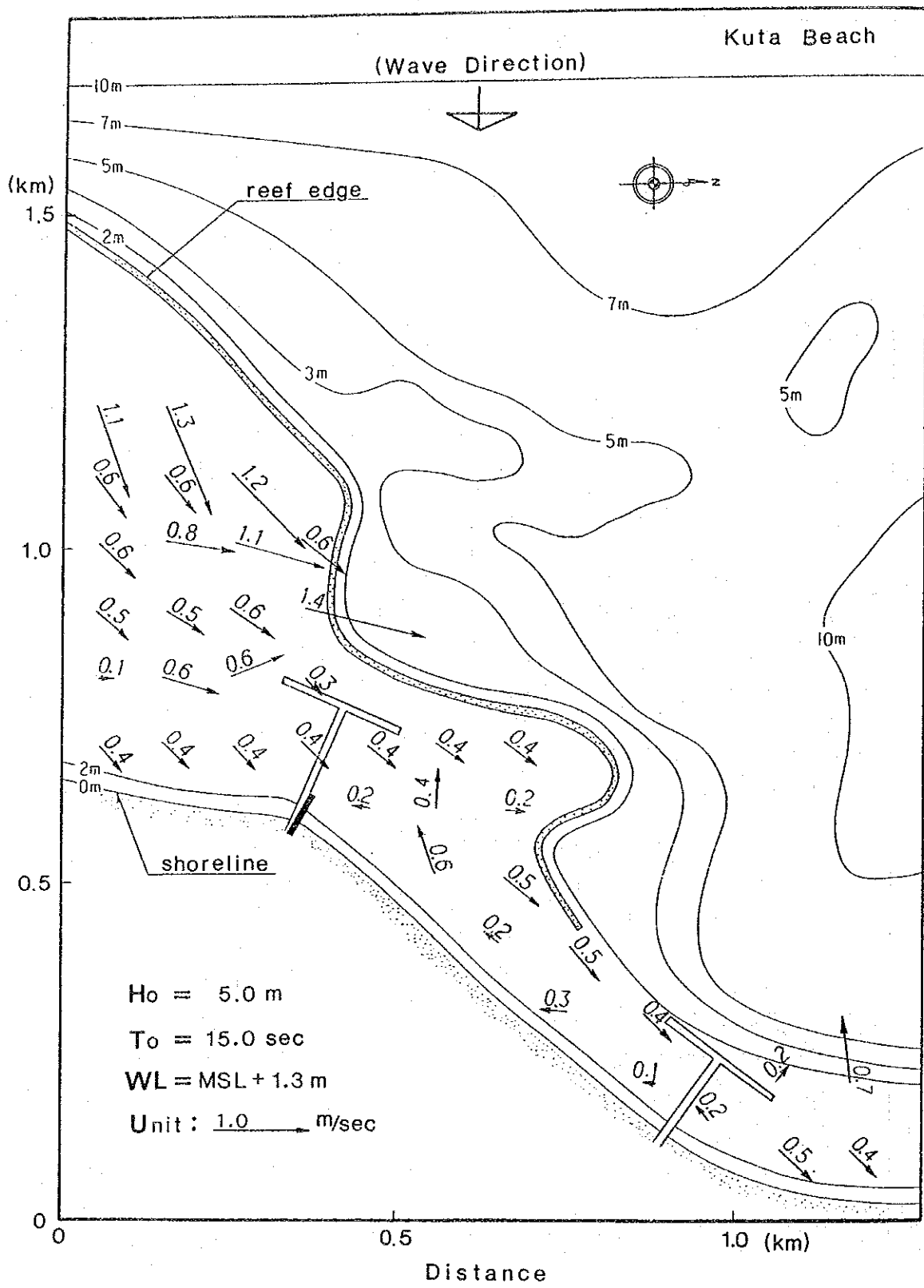


図 5-1-3-10 クタ・ビーチにおける流況 (対策工)

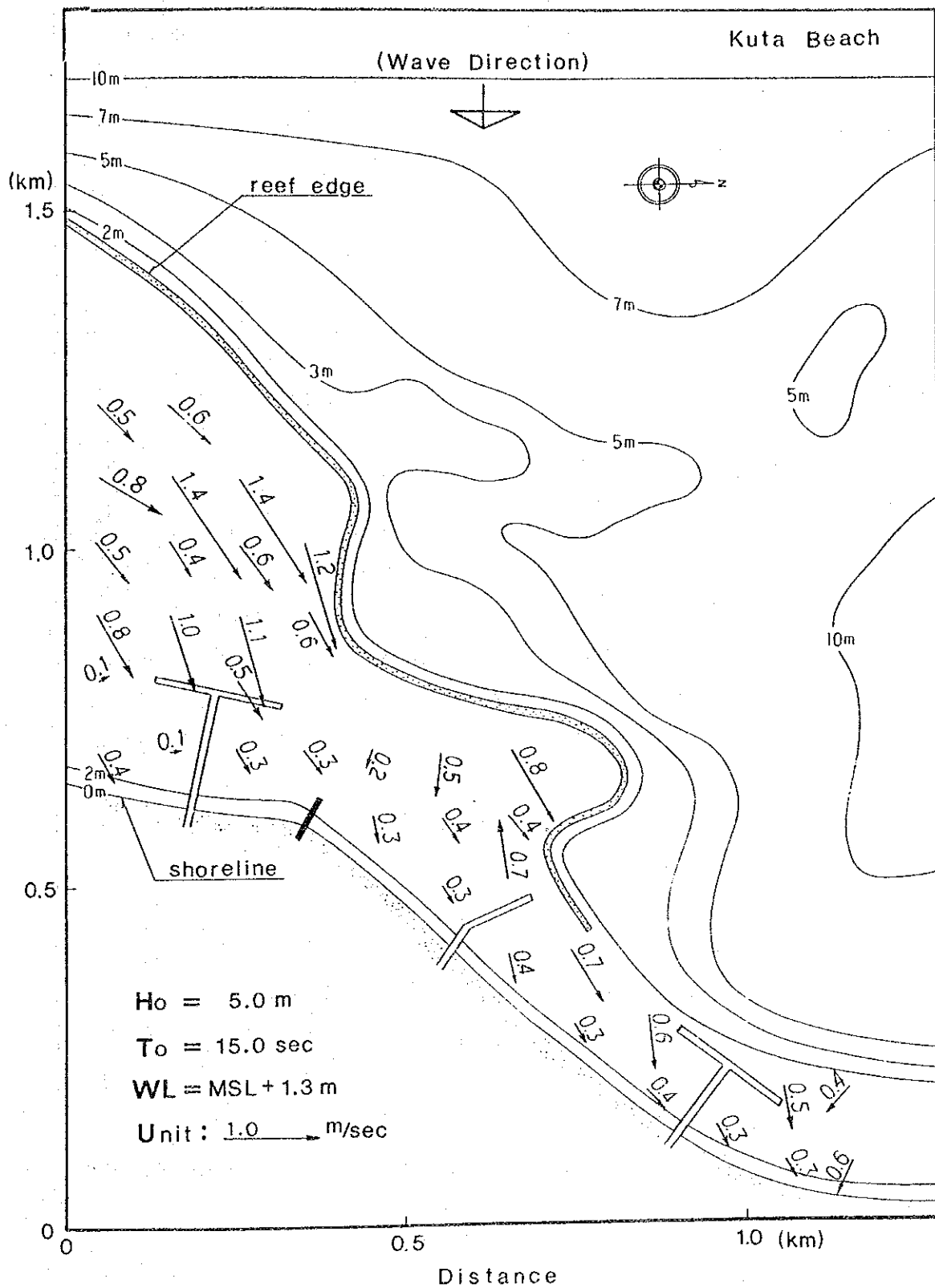


図 5-1-3-11 クタ・ビーチにおける流況 (対策工代替案)

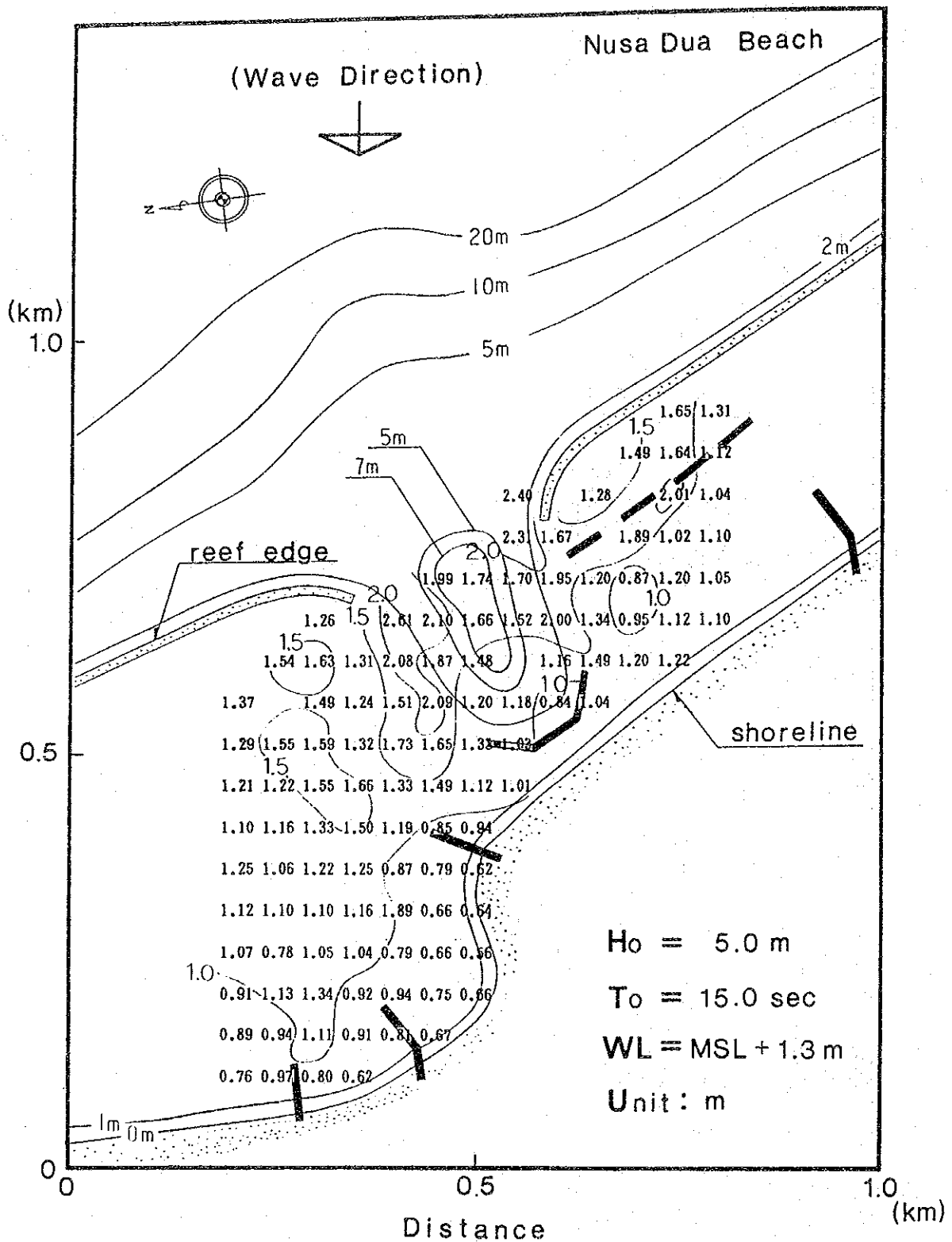


図 5-1-3-12 ヌサドゥア・ビーチにおける波高分布 (現況)

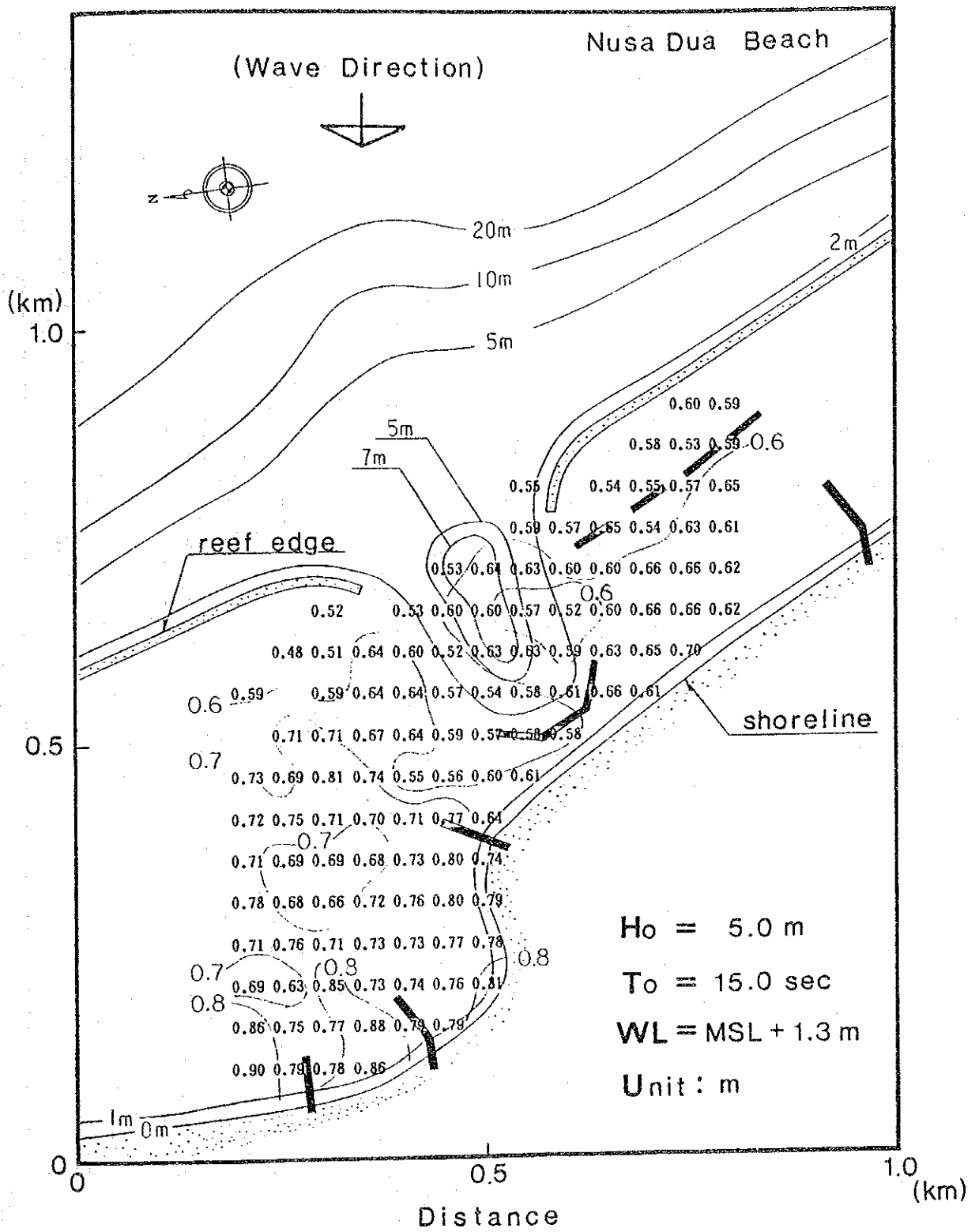


図 5-1-3-13 ヌサドゥア・ビーチにおける平均水位上昇量の分布 (現況)

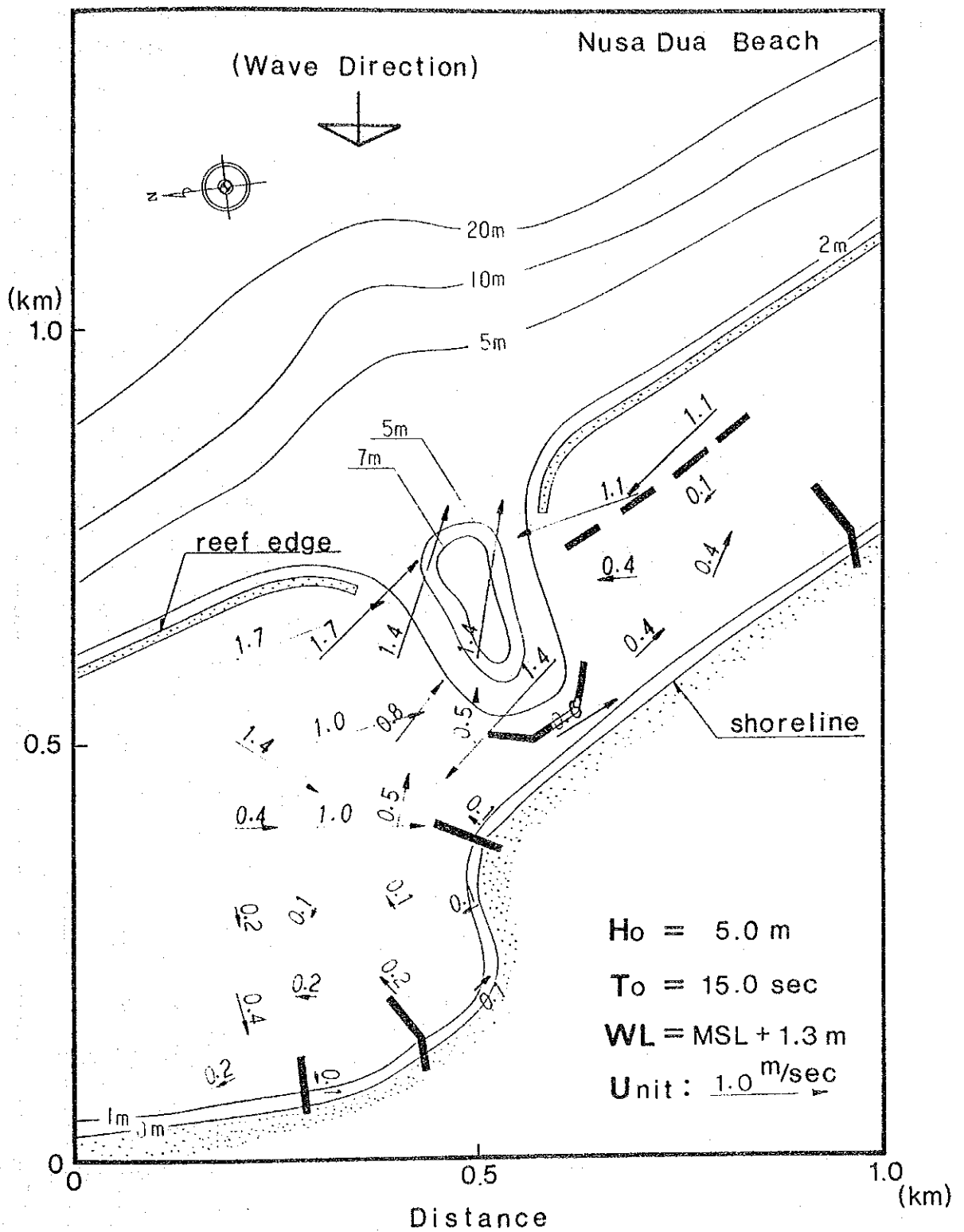


図 5-1-3-15 ヌサドゥア・ビーチにおける流況 (現況)

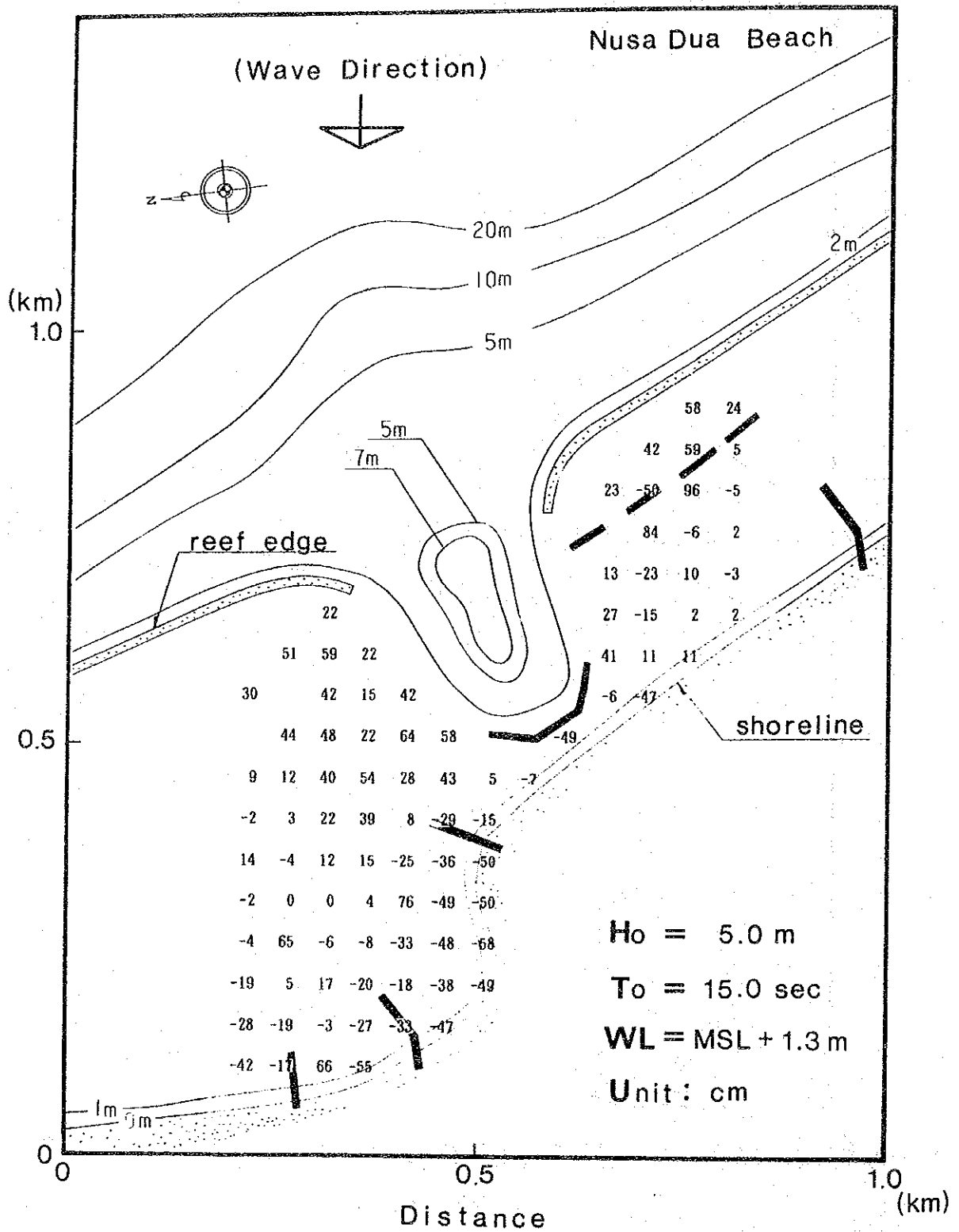


図 5-1-3-16 又サドゥア・ビーチにおける計測波高と計算波高の相違

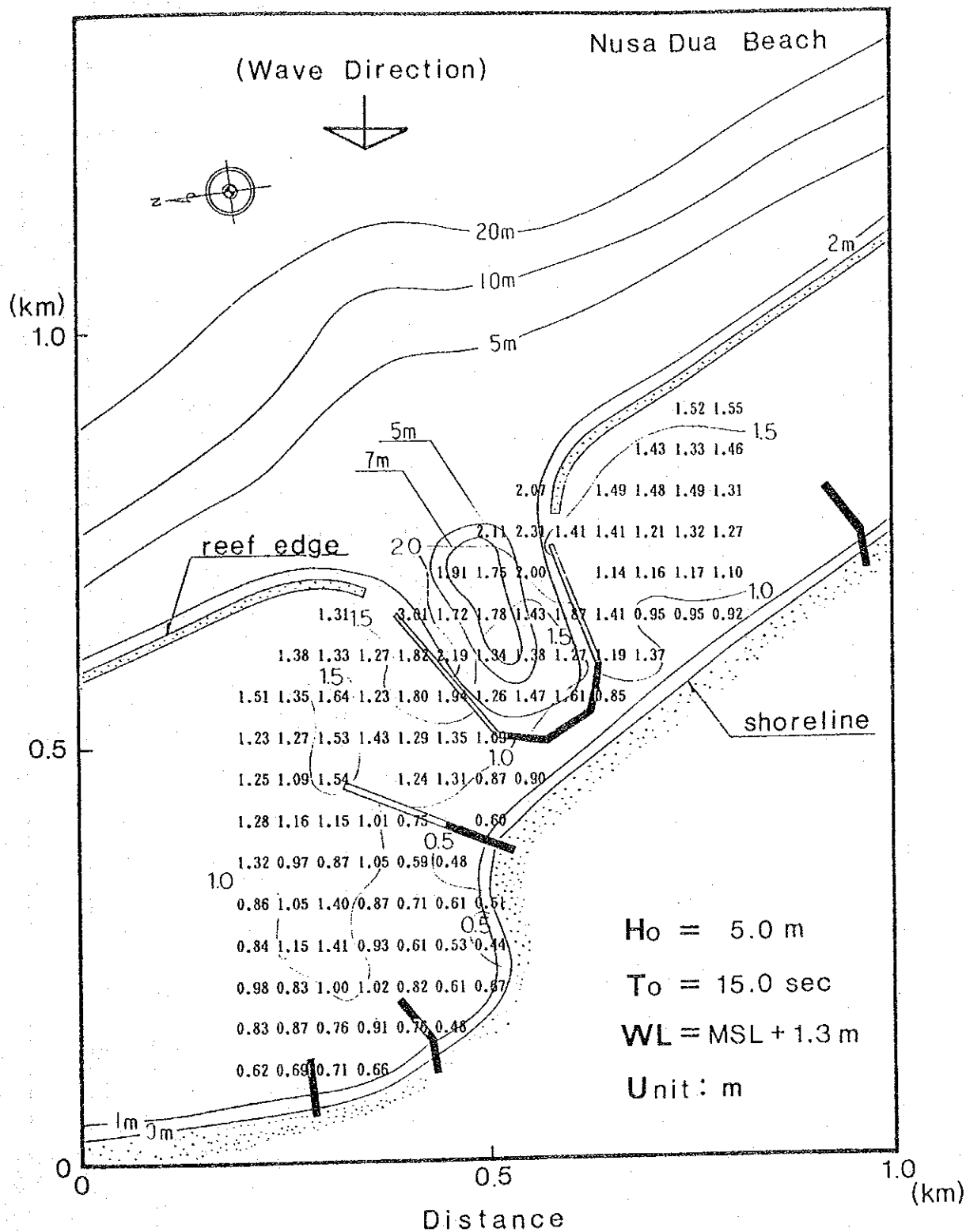


図 5-1-3-17 ヌサドゥア・ビーチにおける波高分布 (対策工)

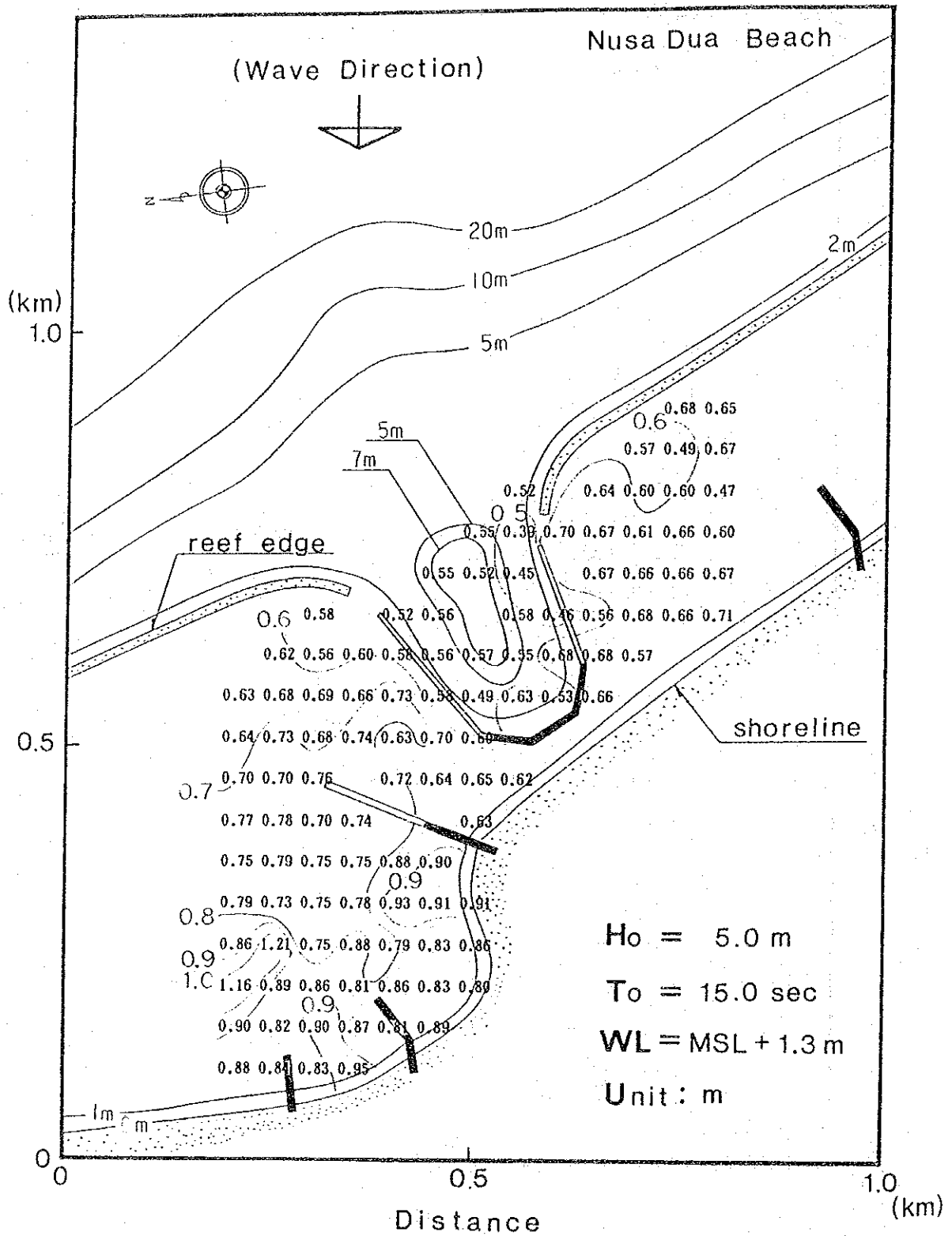


図 5-1-3-18 ヌサドゥア・ビーチにおける平均水位上昇量の分布 (対策工)

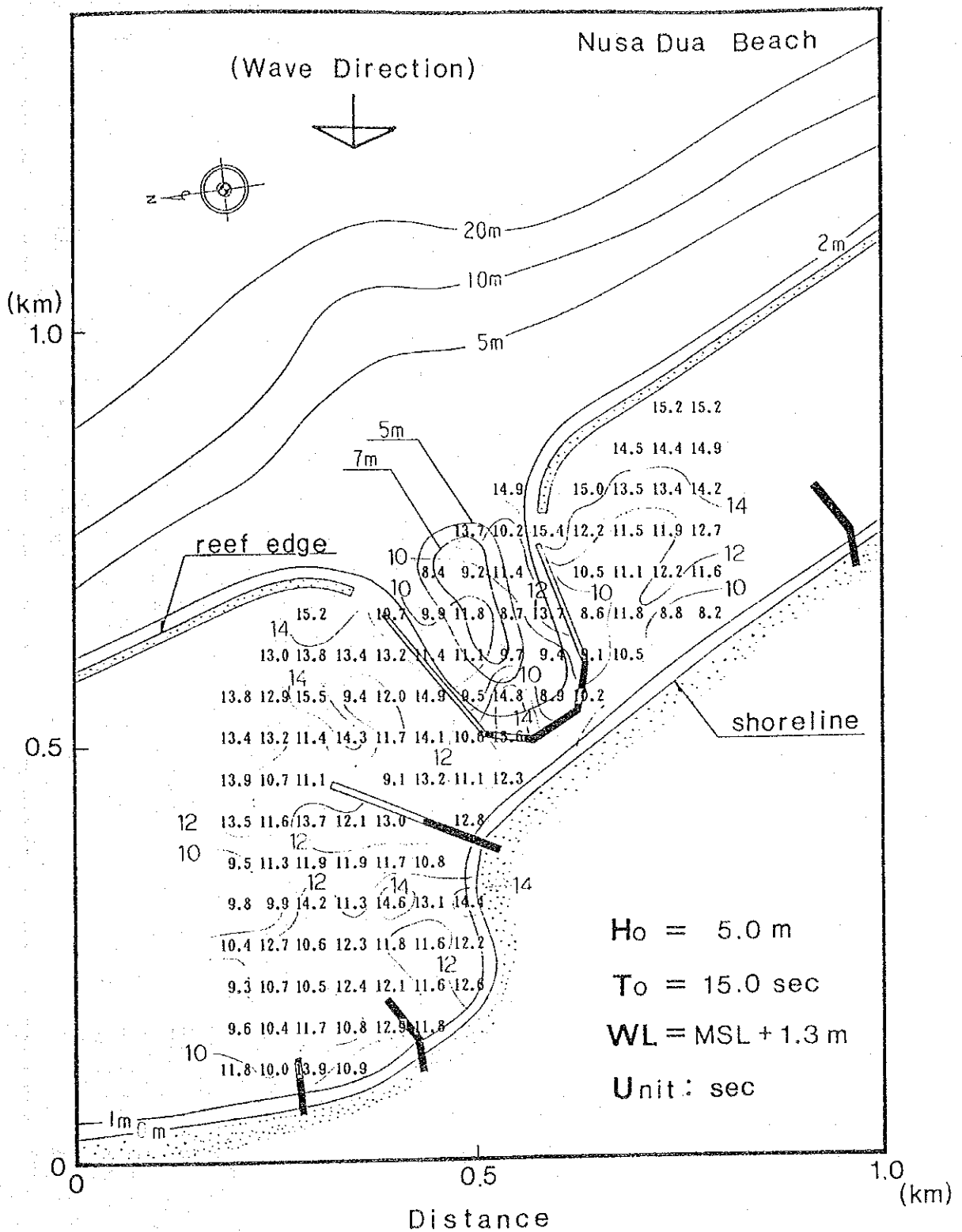


図 5-1-3-19 ナサドゥア・ビーチにおける周期分布 (対策工)

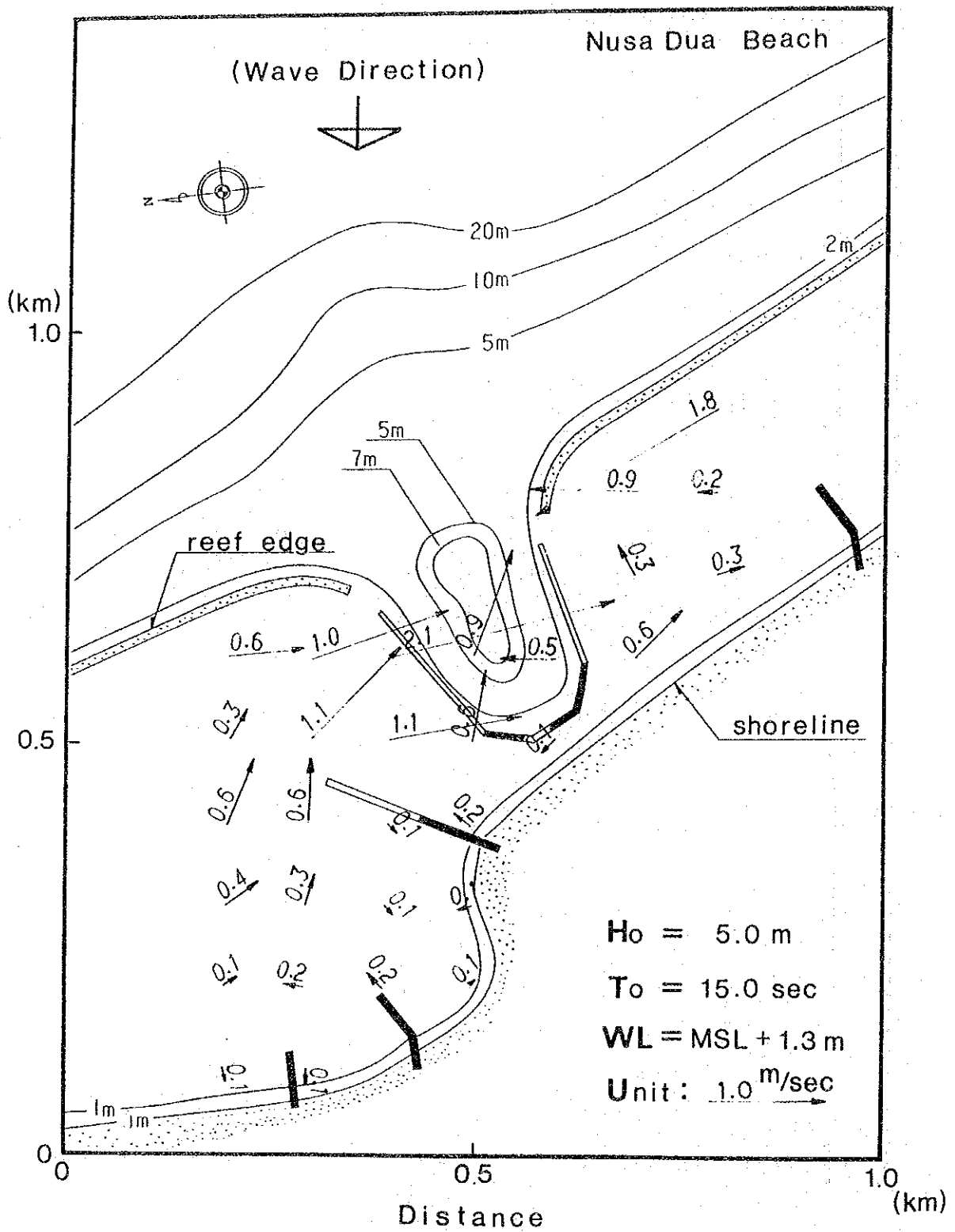
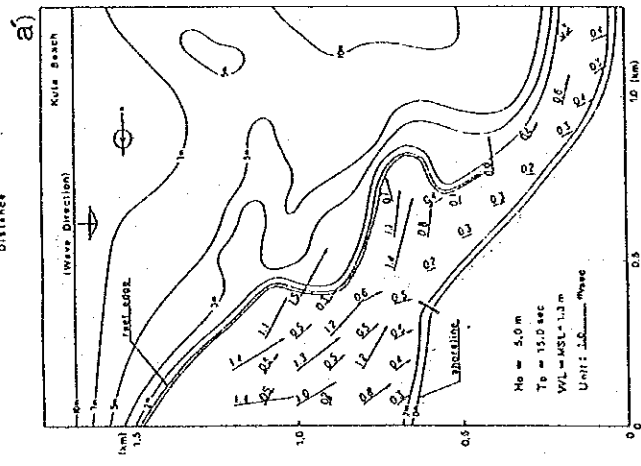
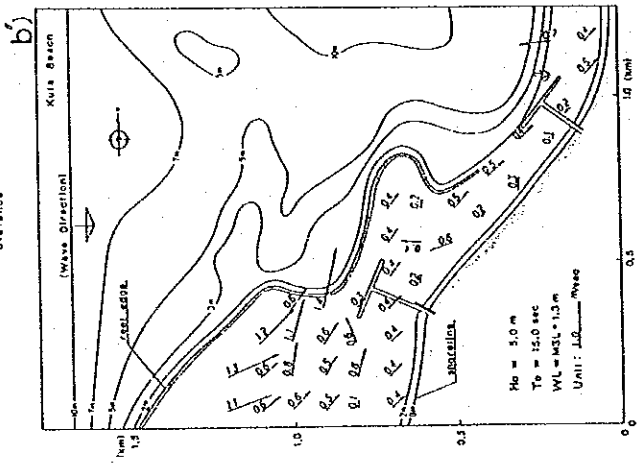
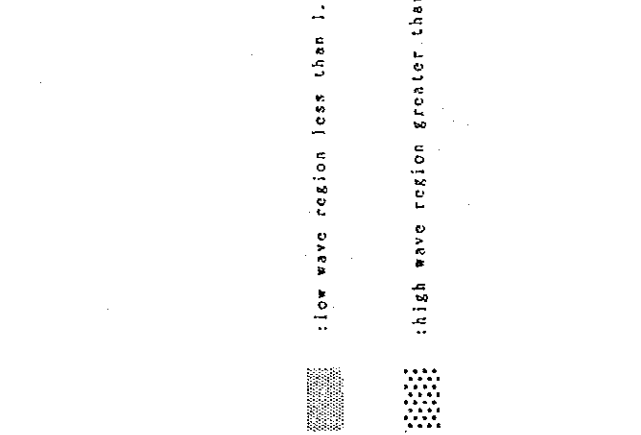
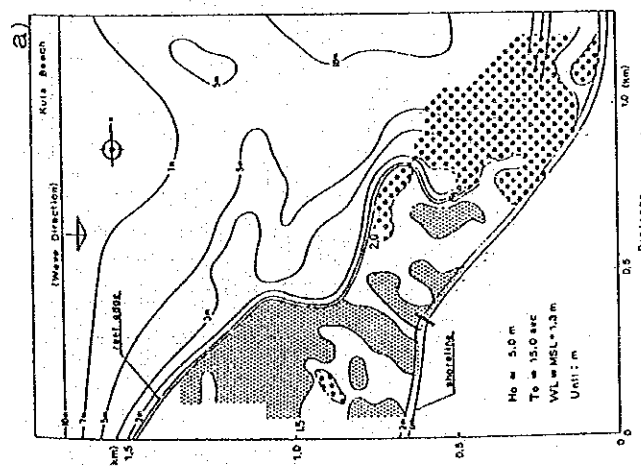
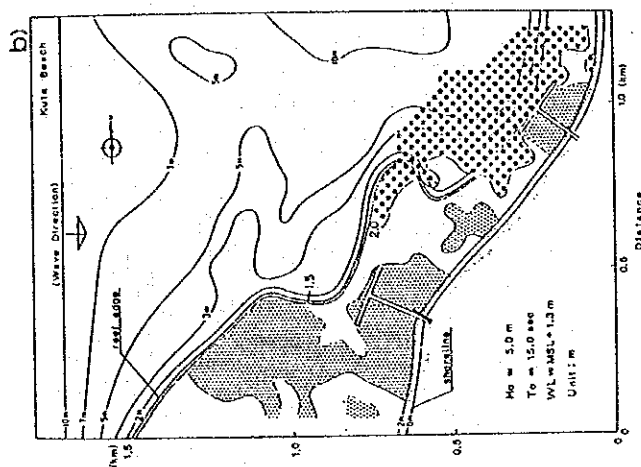
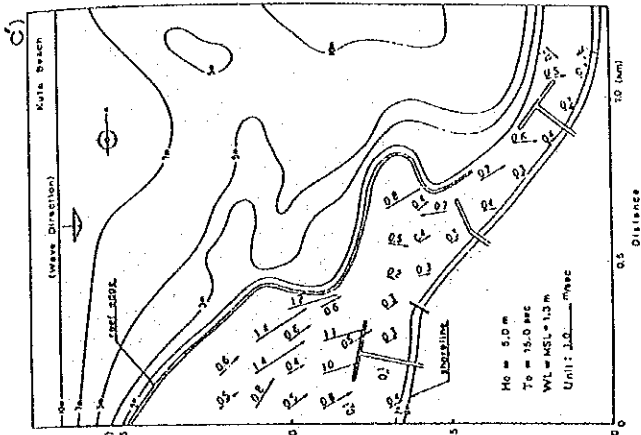


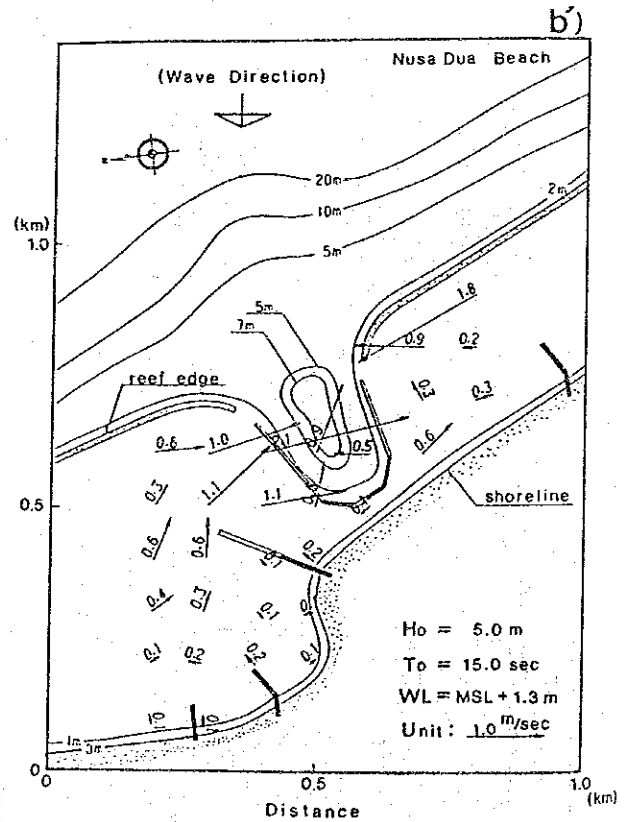
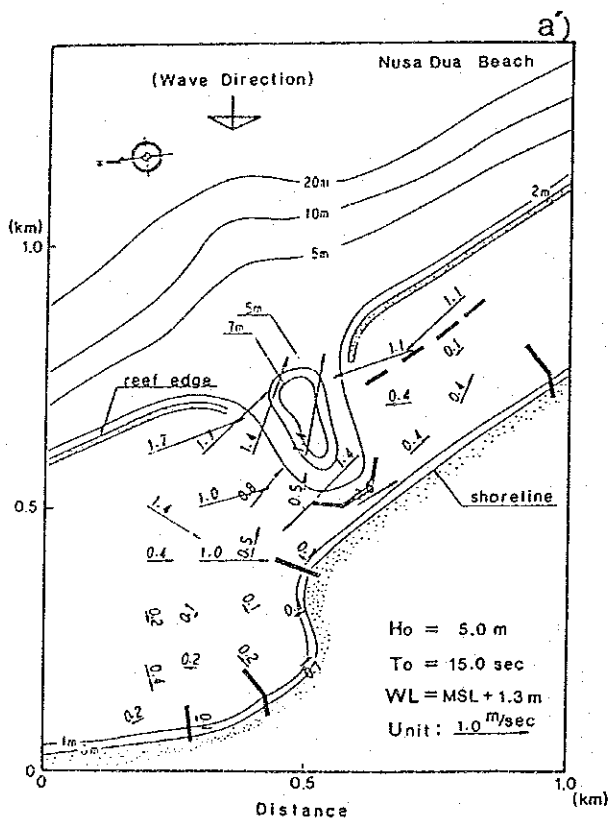
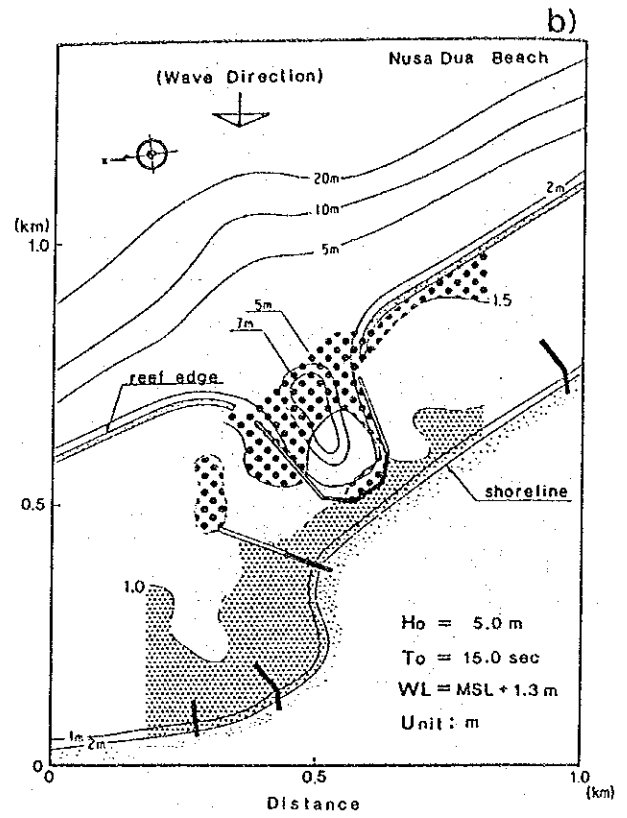
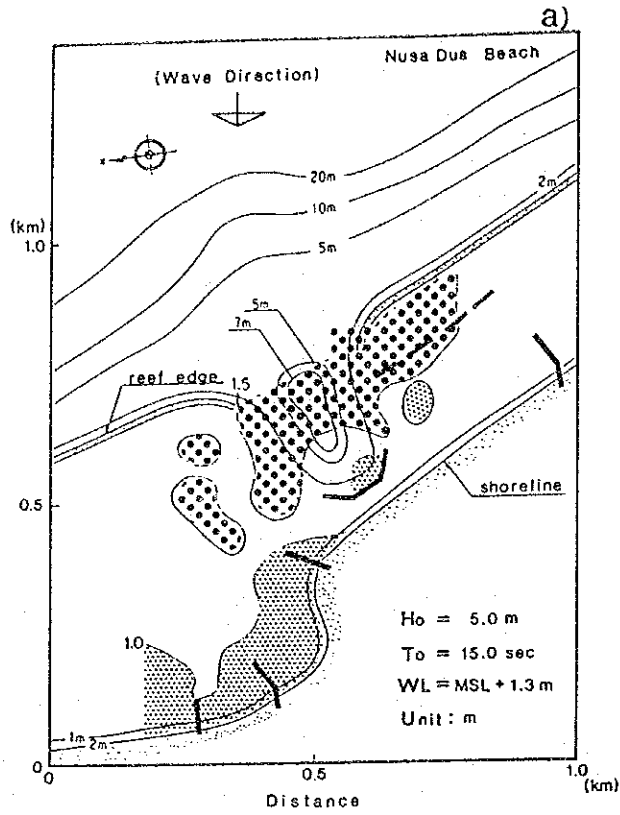
図 5-1-3-20 ヌサドゥア・ビーチにおける流況 (対策工)



: low wave region less than 1.0m

: high wave region greater than 1.5m

図 5-1-3-71 クタ・ドーチにおける水理模型実験結果



▨ : low wave region less than 1.5m

▣ : high wave region greater than 2.0m

図 5-1-3-22 ヌサドゥア・ビーチにおける水理模型実験結果

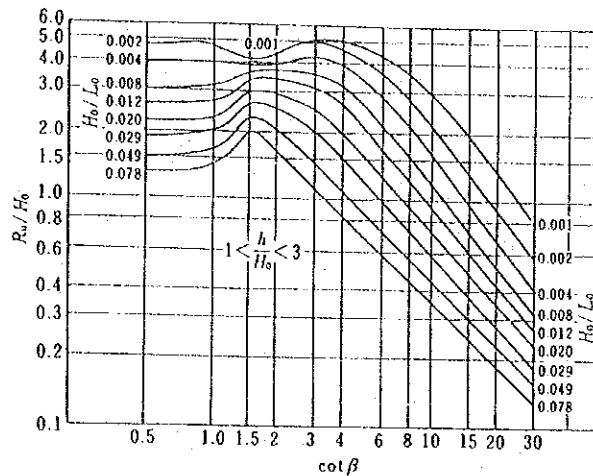


図 5-1-3-23 波の遡上高算定図

5-2 コンピュータ・シミュレーション

5-2-1 はじめに

シミュレーションという言葉は元来模倣という意味であるが1950年代に高速の電子計算機が出現して以来その意味が次第に変わり、今は、実際の現象の数学的モデルを作り、それをコンピュータを用いて実験するという意味となっている。

一般に海岸侵食の問題は、広大な領域に関係し長い時間の間に起こるものである。それゆえ水理模型実験を行う場合には大型となり費用もかさむことになる。この業務においても水理模型実験は対象地点のすべての領域について実施することは出来ず、クタとヌサドゥアの特に興味ある部分だけを取り扱っている。水理模型実験で、漂砂現象を取り扱うことには縮尺の問題があり、海外保全対策工の効果を評価するには、コンピュータ・シミュレーションが適している。

シミュレーションに使われるモデルはいくつか考えられるが、ここでは問題の性質と使えるデータから判断し、ワンラインモデルを使用する。ワンラインモデルは次元モデルであり、砂浜海岸の汀線の前進後退を取り扱う。将来、より詳しい資料が集積され、より詳細な調査が必要になったときにはより精密なモデルによるシミュレーションが必要になる可能性がある。

ワンラインモデルによるシミュレーションは以下の手順による。まず、過去のある時点（例えば10年前）から、その後のある時点（例えば現在）までに観測された汀線変化をこのモデルによって最もよく再現する代表波を決定する。次にその代表波を用いて、対策工の施された海岸線の将来の変化を予測することになる。

海象及び砂の性質に関する資料は、この代表波を決定する際に参考となるが、ここではこれらの資料が不十分であり、汀線変化の資料を主たる根拠として代表波を決定

することにする。クタとサヌールでは1987年に汀線測量が行われており、ヌサドゥアでは1983年に行われている。これらの結果と今回1988年に実施された汀線測量との間の汀線変化が代表波を決める主資料となる。

土砂の粒径分布を調べた結果、砕波帯内での中央粒径はクタで0.15mm (図2-5-2-8)、ヌサドゥアで1.0mm (図2-5-2-10)、サヌールで0.3~1.0mm (図2-5-2-12) 程度である。又土砂の組成分析によれば、比較的重い磁性物質がクタで5~15% (図2-5-2-9)、ヌサドゥアでは3%以下 (図2-5-2-11)、サヌールではバリビーチホテル前面ピアアの南側で2%以下、北側で90%以上 (図2-5-2-13) 見出された。これら粒子の性質が土砂の動き易さを支配する。即ち重い又は大きい粒子は動きにくいというわけである。

バリ南方のインド洋上での海象資料 (図 2-3-2) がバリ島に入射する波の性質を推定するのに用いられる (次節)。

5-2-2 入射波の性質

いろいろな波の中で漂砂現象に最も効果的なのはインド洋から来るうねりである。米国海軍の世界海象図集Ⅲインド洋 (1976) にインド洋の多くの観測地点での波の高さ、周期、方向等についての統計が載っている。そのうちの一点がバリ島の南方に位置しているのでその資料をここで用いる。統計は米国海軍気象観測艦隊その他の1876年まで120年間の目視観測に基いている。

それによれば、そのうねりはエネルギー平均をとると周期約8秒、波高約2mで方向は大体南東から南西に分布している。うねりは海洋上を伝播するとき主に分散効果により周期は大きくなり波高は減衰することが知られている。プレトシュナイダーの計算法を用いると、その観測点からバリ島までうねりが伝播する間に周期は約25%大きくなり、波高は75%減衰することになる。これを考慮しつつ、波の周期として10秒、15秒をとり上げ、方向としては南東、南、南西の三方向をとり上げる。15秒という周期は実際に当業務の観測期間中にリーフエッジ外側で観測された代表的な周期でもある。

海の水深が波長の半分程度に浅くなると屈折により波は方向と高さを変える。図5-2-2-1にはバリ島南部周辺海域の等深線と各対象地点沖の入射波のデータを取り出す地点を示している。図5-2-2-2~7(a)には上記2つの周期と三方向の6つの組み合わせについて各々波の進行方向を示している。長周期の波は屈折の程度が大きくなる。図5-2-2-2~7(b)には対応する6つのケースの計算結果に基いて等波高線が示されている。ここで波高を示す数字はそこでの波高と入射波高との比である。

表5-2-2-1には各対象地点沖合での波の方向と高さを示している。そこでkは波高比、Qは南から東の方へ度で計った角度である。これによれば各地点で波はおおよそ次の方向から入射する。

-59~-36°	クタ
8~ 64°	ヌサドゥア
14~ 59°	サヌール
-54~-16°	タナロット

各対象地点の波高は、うねりの入射方向に強く依存している。南東から入射するうねりはクタ及びタナロットへの影響が非常に小さい一方、南西からのうねりはサヌールへの影響がとても小さい。

これらの出力地点は各対象地点の沖合で水深18~26mにある。この波がサンゴ礁（水深1~2m）の沖側の端で砕波し、波は周期及び波高ともに小さくなる。この過程は非線形現象であるが沖合から汀線付近までの波の伝播（屈折、回折、浅水変形）計算においても線形近似を用いる。そこで、漂砂現象に最も効く汀線付近の砕波帯内の波を表現すべく、この伝播計算において初めから短い周期の波を用いることとする。

表 5-2-2-1 調査対象海岸沖波の特性

Site		S E		S		S W	
		θ	k	θ	k	θ	k
NUSA DUA 18m - deep	10	58	0.92	26	0.79	8	0.48
	15	64	0.96	43	0.86	29	0.62
SANUR 26m - deep	10	53	0.81	24	0.66	14	0.25
	15	59	0.75	44	0.64	38	0.29
KUTA 21m - deep	10	-36	0.13	-37	0.37	-54	0.80
	15	-44	0.22	-47	0.50	-59	0.78
TANAH LOT 23m - deep	10	-16	0.22	-20	0.67	-50	0.93
	15	-29	0.38	-34	0.66	-54	0.96

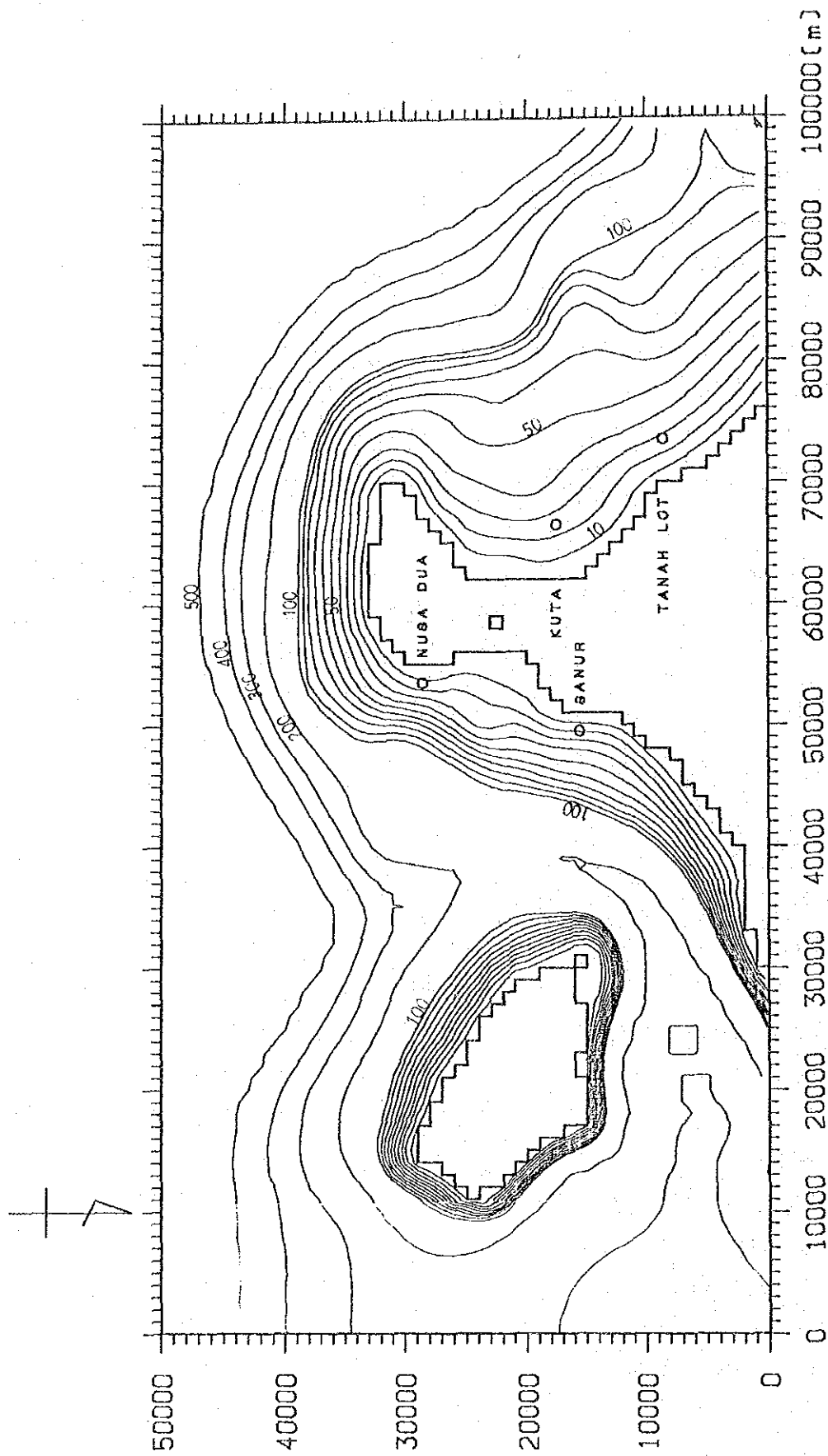


図 5-2-2-1 バリ島南部周辺海域の等深線の調査対象海岸沖の入射波を
取り出す地点

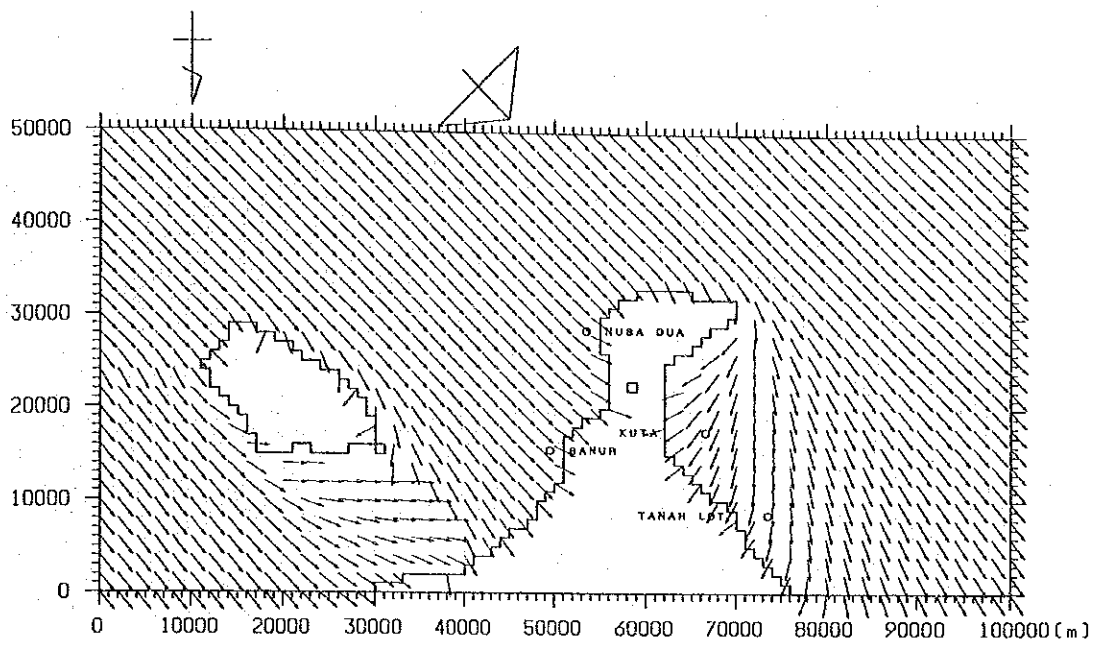


图 5-2-2-2(a) 波向线图 (10sec, SE)

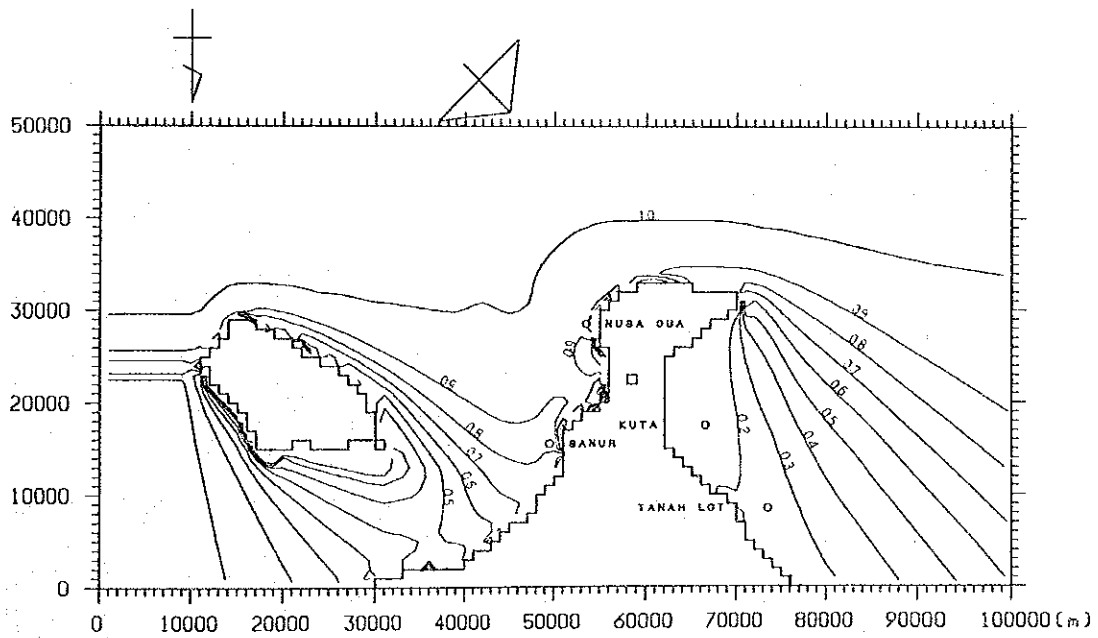


图 5-2-2-2(b) 波高分布 (10sec, SE)

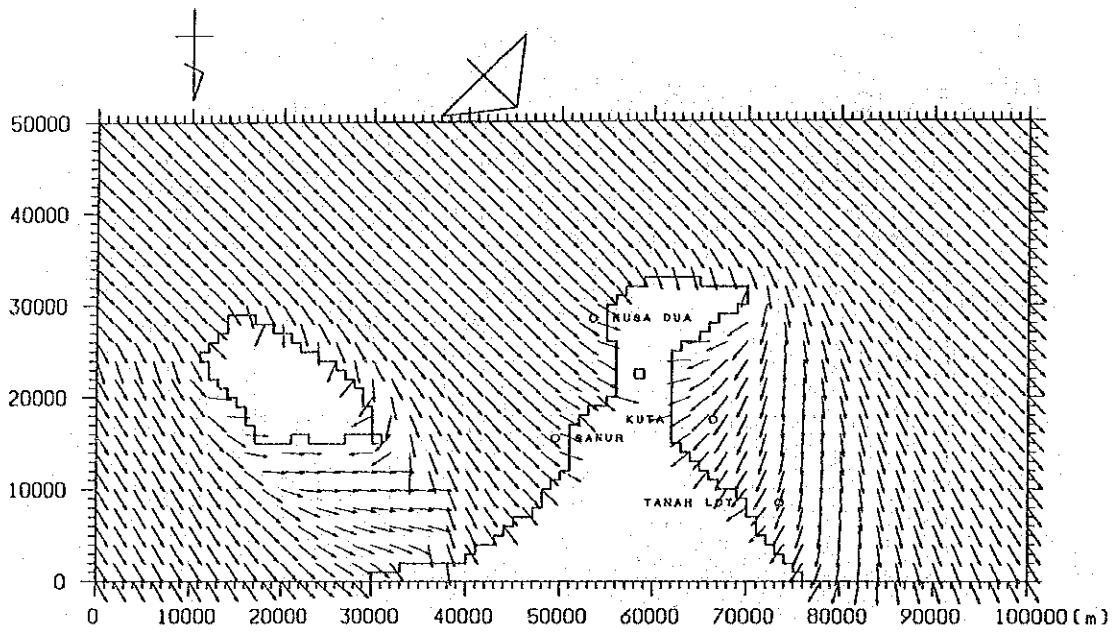


图 5-2-2-3(a) 波向线图 (15sec, SE)

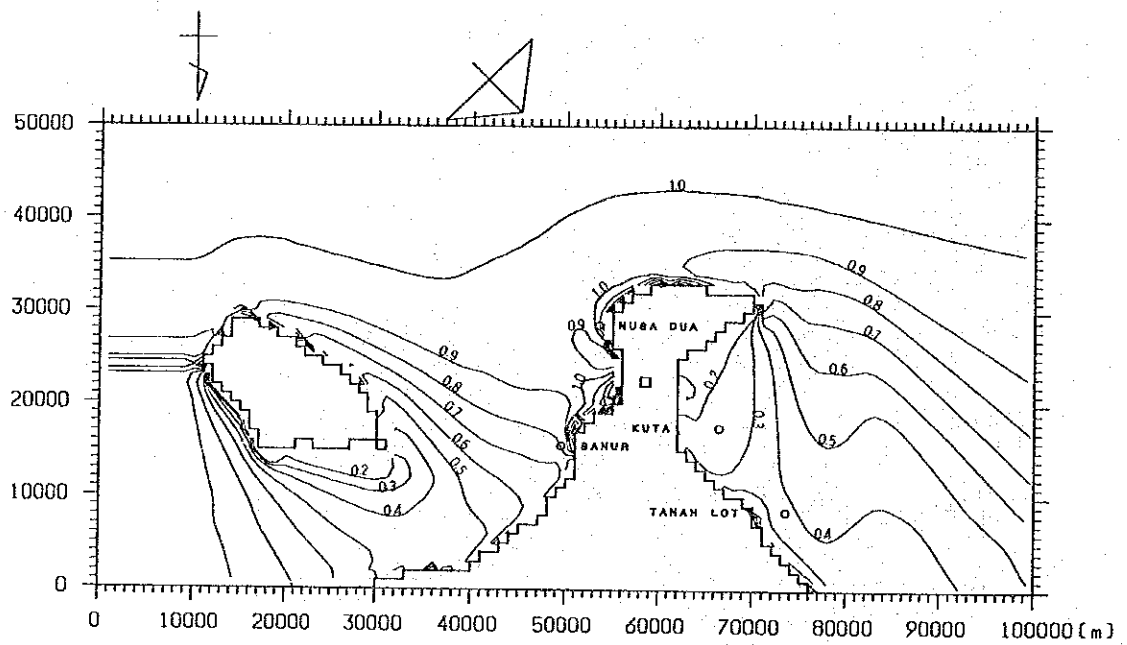


图 5-2-2-3(b) 波高分布 (15sec, SE)

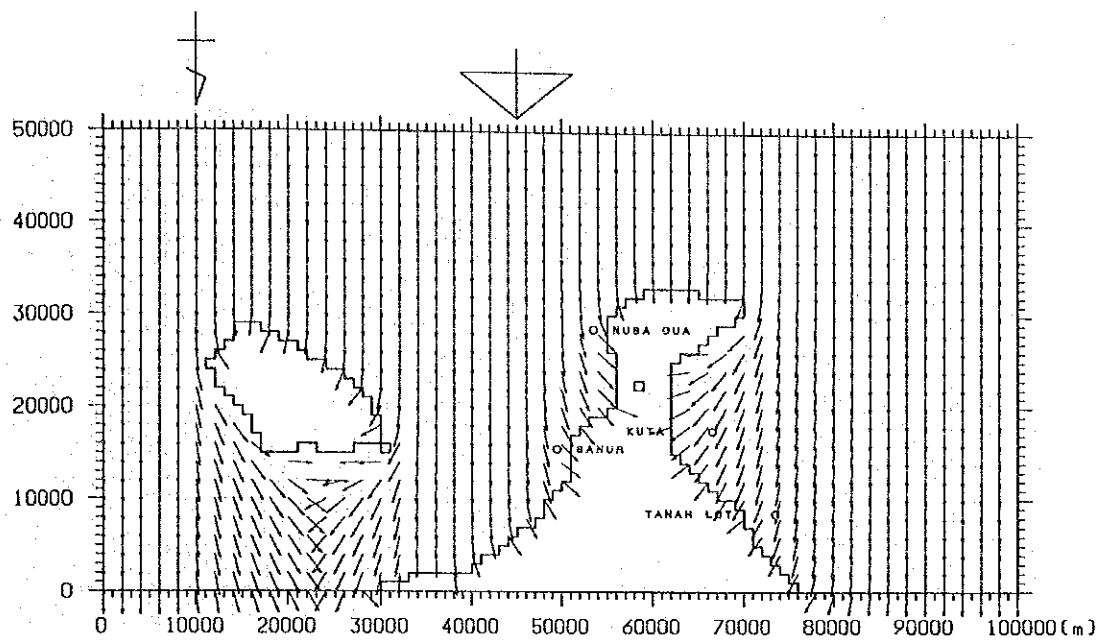


图 5-2-2-4(a) 波向线图 (10sec, S)

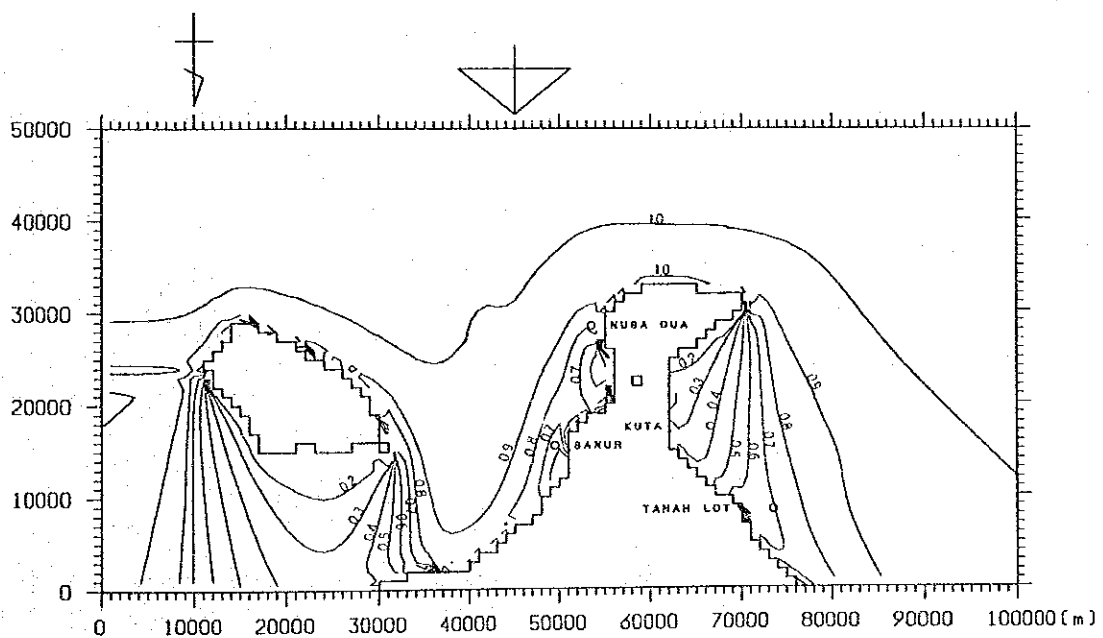


图 5-2-2-4(b) 波高分布 (10sec, S)

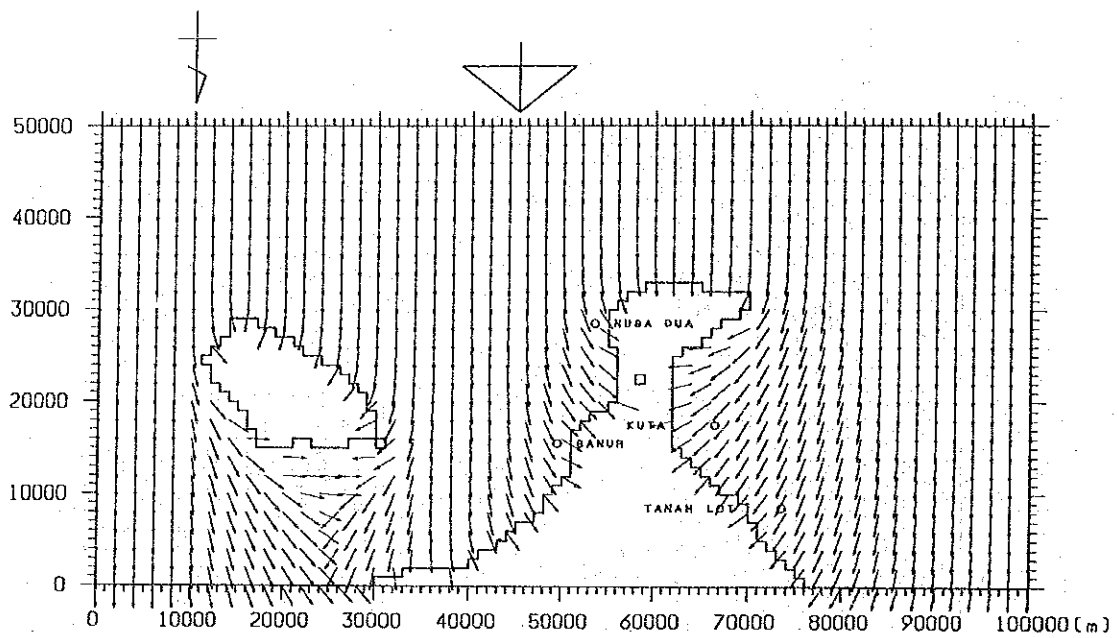


图 5-2-2-5(a) 波向线图 (15sec, S)

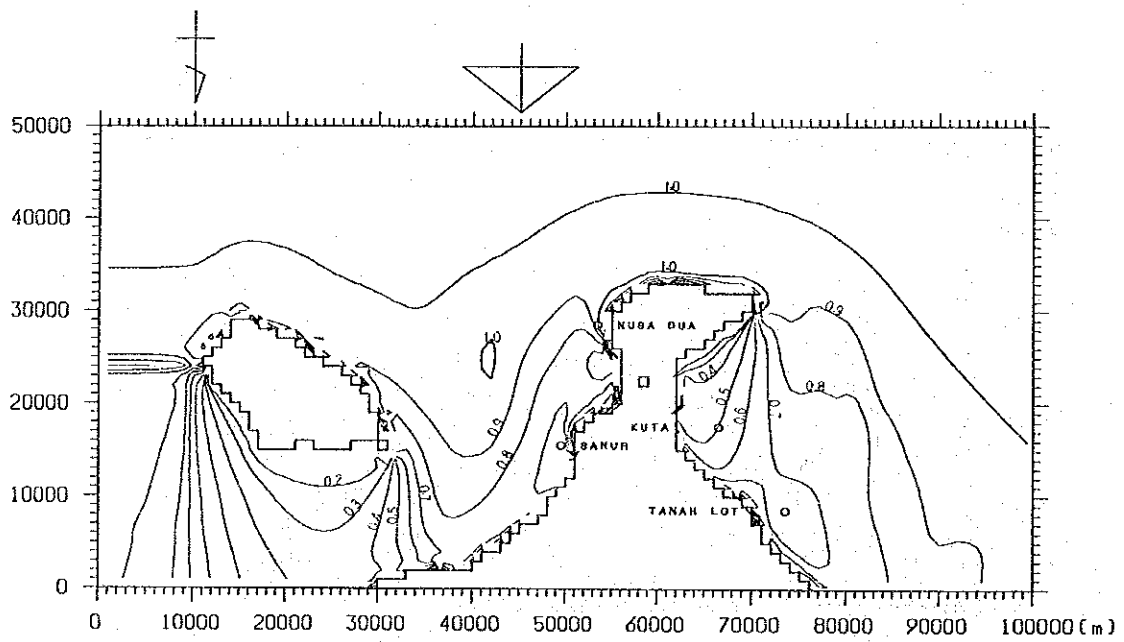


图 5-2-2-5(b) 波高分布 (15sec, S)

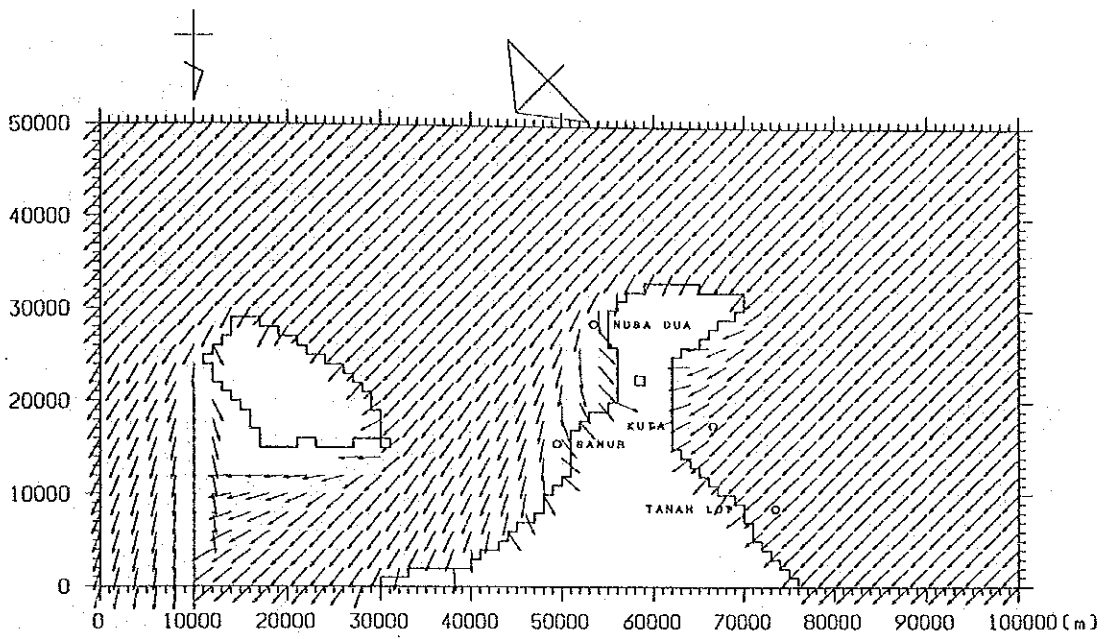


图 5-2-2-6(a) 波向线图 (10sec, SW)

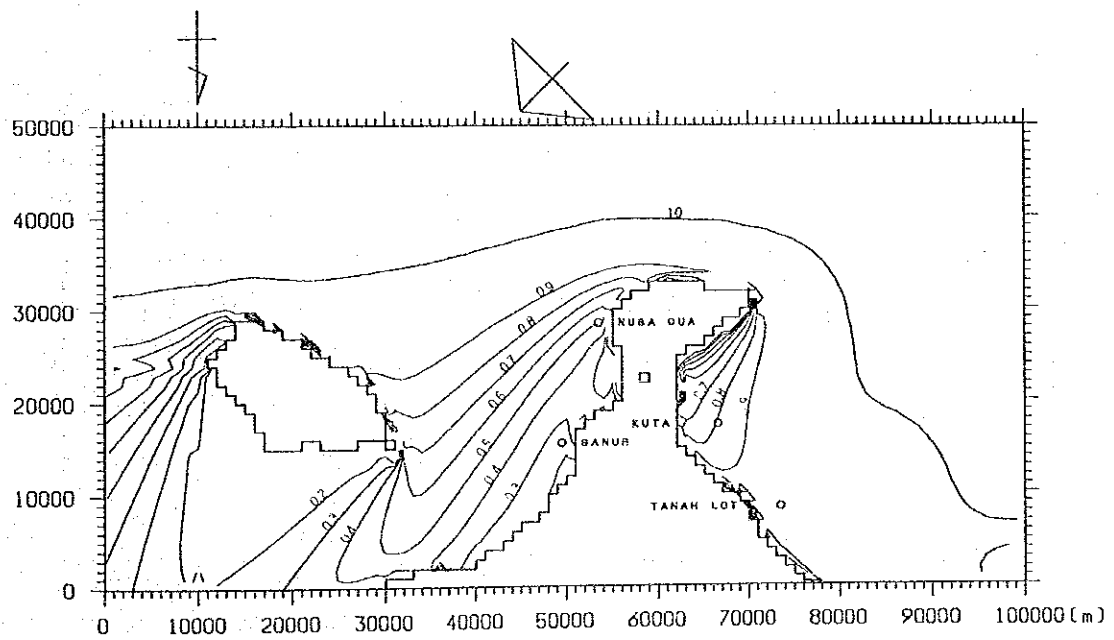


图 5-2-2-6(b) 波高分布 (10sec, SW)

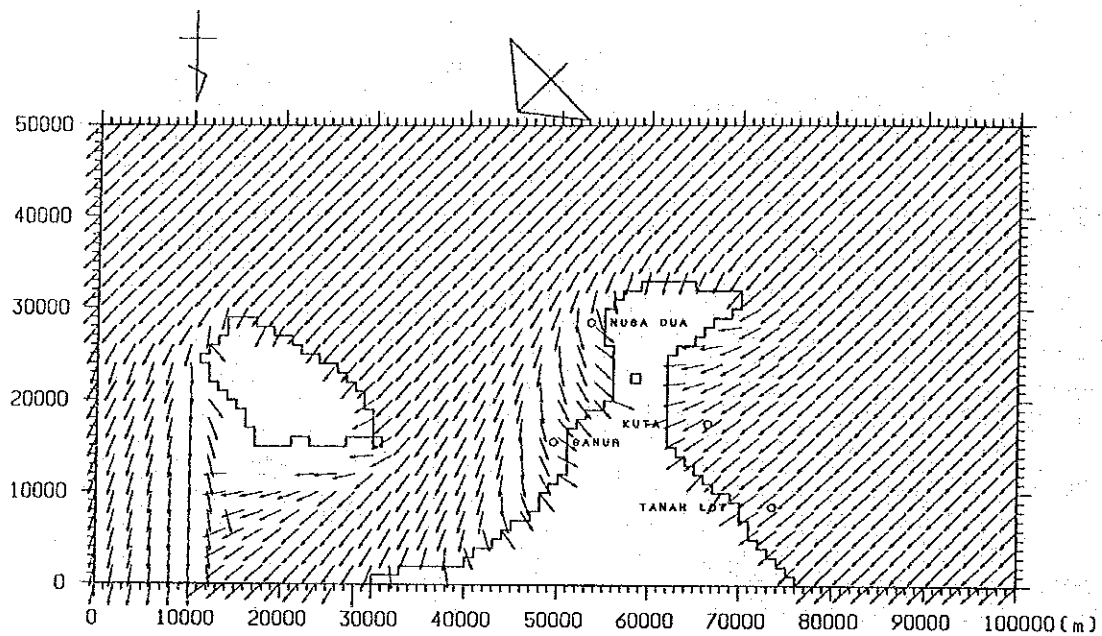


图 5-2-2-7(a) 波向线图 (15sec, SW)

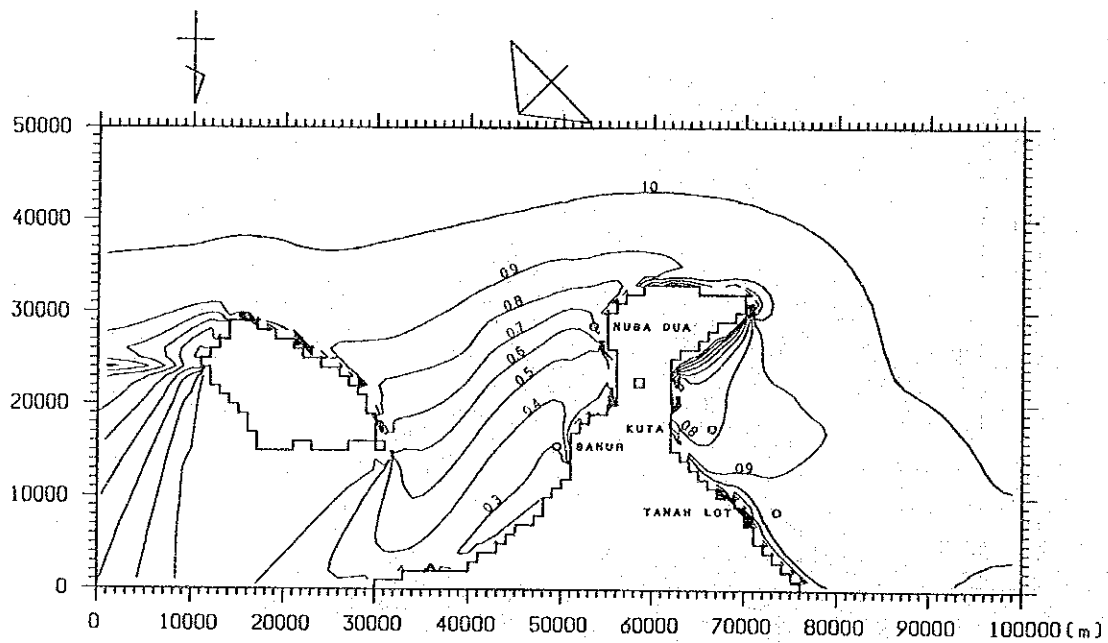


图 5-2-2-7(b) 波高分布 (15sec, SW)