

港 湾 技 研 資 料

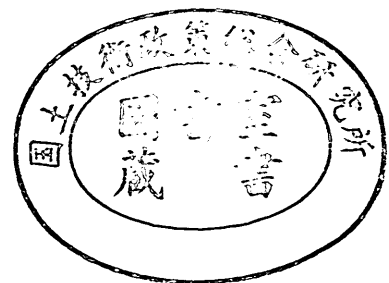
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 278 Sept. 1977

リーフ上の波の変形に関する研究

高 山 知 司
神 山 豊
菊 地 治

運輸省港湾技術研究所



リーフ上の波の変形に関する研究

目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 実験装置と実験条件	4
2.1 実験装置	4
2.2 実験条件	5
3. 実験手順と予備実験	7
3.1 実験手順	7
3.2 予備実験	7
4. 波の変形	9
4.1 定性的な波の変形	9
4.2 波の変形特性	11
5. 平均水位の変化およびサーフビート	21
5.1 平均水位の変化	21
5.2 サーフビート	24
6. 実験式による波高変化と水位上昇	27
6.1 実験式の誘導	27
6.2 計算結果と実験値との比較	28
7. 結 論	31
参考文献	32
記号一覧表	32

Wave Transformation On a Reef

Tomotsuka TAKAYAMA*

Yutaka KAMIYAMA**

Osamu KIKUCHI**

Synopsis

Model tests have been carried out in order to make clear the characteristics of wave transformation, elevation of mean water level or surf beats on a reef with a water depth of 0m to 5.0m and a length of 200m to 2000m. In the tests, three types of model reefs are adopted: one has a flat plane over the reef, another has a continuous small atoll at the reef front, and the last has a small atoll with a gap at the front.

The model tests drew the following characteristics of waves over the reef.

- 1) Wave heights increase to maximum height on the slope in front of the reef, and then decay rapidly on the slope and the reef front area. They seem to approach to constant values as the waves travel on the reef.
- 2) Between two wave trains with same wave steepness, a train with larger ratio of water depth on the reef to its significant wave height in deep water decays its heights on the reef less than the other.
- 3) Between two wave trains with the same ratio of water depth, a train with smaller wave steepness decrease its heights less than the other.
- 4) The mean water elevation begins to increase on the slope in front of the reef, and continue to become higher even on the reef. However, after it reaches the maximum, it decreases gradually.

Based on the above characteristics, the empirical formulas are derived on the purpose of the estimation of the wave transformation and the mean water elevation. In the results of the comparison between the calculated values and the experimental ones, the formulas are verified to be applicable to the estimation of wave heights or the mean water level on the reef.

*Chief of the Storm Surge and Tsunami Laboratory, Hydraulic Engineering Division
**Member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

リーフ上の波の変形に関する研究

高山知司^{*}
神山 豊^{**}
菊地 治^{**}

要 旨

水深が 0 m～5.0 m と非常に浅く、長さが 200 m～2,000 m にもなるリーフに波が侵入してきた場合のリーフ上における波の諸特性を明らかにするために模型実験を行った。模型としてはリーフ先端部に環礁がある場合とない場合、また環礁があっても不連続になっている場合と連続な場合の 3 ケースである。潮位としては + 0.5 m, + 2.0 m, + 3.0 m, 波は風波とうねり性の波に分け、風波 4 種類とうねり 2 種類の波を用いた。模型縮尺は 1/50 とした。

実験の結果、波高は斜面上で最大値を示し、その後急激に減少するけれども、その減少率は次第に小さくなり、最終的には一定値に近づく傾向を示す。平均水位は斜面上から上昇し始め、リーフ上でも上昇し、ある地点で最大値を示した後には次第に減少する。この減少は模型の継ぎ目や側壁とのすき間からの水の流出によると考えられる。サーフビートの大きさは合田の提案した式と非常に良い一致を示した。

以上の実験結果を下にして、波高変化および水位の上昇量を算定する実験式を提案した。この実験式に基づいて計算した値と実験値とは非常によく一致した。この実験式は環礁なしリーフを対象にしたものであるが、波高変化に対しては環礁ある場合にも適用できる。しかし、平均水位の上昇量については環礁のある場合には適用できないため計算値を補正して使用する必要がある。

1. ま え が き

沖縄の海岸の大部分は水深の浅いサンゴのリーフ海岸からなっている。このため波高の大きい海洋からの侵入波はこのリーフ上で砕波し、海岸線には砕波後の波高の小さい波しか到達しない。このようにリーフは天然の潜堤ともなっていて、海岸保全の面からみると非常に有効な働きをしている。しかし、水深が 0 m から 5.0 m 程度で非常に浅く、また長さが 0.2 km から 2 km もあるリーフ上での波の変形については、定性的には今までの研究成果から推測することができるが、定量的に把握するまでには到っていない。このような定量的把握の遅れは、リーフ上での波の変形現象そのものが波の非線型干渉を含んだ非常に複雑な現象であることに起因している。

リーフの効果を的確に把握し、海岸保全に有効な構造物を建造するためには、このような複雑な現象を示すリーフ上の波の変形を解明することが必要となっている。

傾斜面上での砕波による波の変形については Battjes¹⁾ や合田²⁾ による研究でかなりの程度まで定量的に算定することができるようになってきているが、リーフ上の波の変形のように、リーフ前面の斜面上で砕波した波が段波状になってリーフ上の水平部に乗り上げ、砕けながら伝播し、伝播中に変形する現象については全く解明されていない。また、このような複雑な波の変形に加えて、平均水位の上昇あるいはリーフ上でのサーフビート現象、波そのものの分裂現象など多くの未解決の現象が重なって現われてくる。ここで述べたような現象は個々に独立して現われるわけではなく、お互いに関連しながら現われてくるため、現象は一層複雑になってきている。

このような複雑な現象の解明の第一歩としては、現地実験あるいは模型実験によって現象をよく観測し、現象の特性、つまり波の変形特性、平均水位の変化あるいはサーフビートの特性などを明確にすることである。このような観点に立って、いくつかの特徴的なリーフ形状に

* 水工部 高潮津波研究室長

** 海洋水理部 波浪研究室員

ついて二次元模型実験を実施した。この模型は特定の地点のリーフ形状を対象としたものではなく、リーフ形状を簡略化し、より一般性を持たせるようにしている。サーフビートの現象は入射波の波高変動に伴う平均水位の変化として現われるという Longuet-Higgins の見解³⁾ や実際の海の波は不規則波であることを考えて、入射波としては不規則波を用いた。

本報告では、沖縄のリーフ海岸を対象として行った二次元模型実験で得られた波の変形特性、平均水位上昇あるいはサーフビートの特性について述べるとともに、波の変形および平均水位の上昇量の算定式を提案する。

2. 実験装置と実験条件

2.1 実験装置

(1) 造波水路

本実験は不規則波を用いた断面実験であることやリーフの長さ(礁原)を長く取る必要があることから、不規則波を発生することができる長水路が必要となる。そこで、実験には港湾技術研究所の40m不規則波造波水路を用いた。この水路の諸元は図-1に示す通りである。この水路は造波板前面では2mの幅を有し、以後7mの区間で漸次縮小されて、1.5mの一樣水路幅となっている

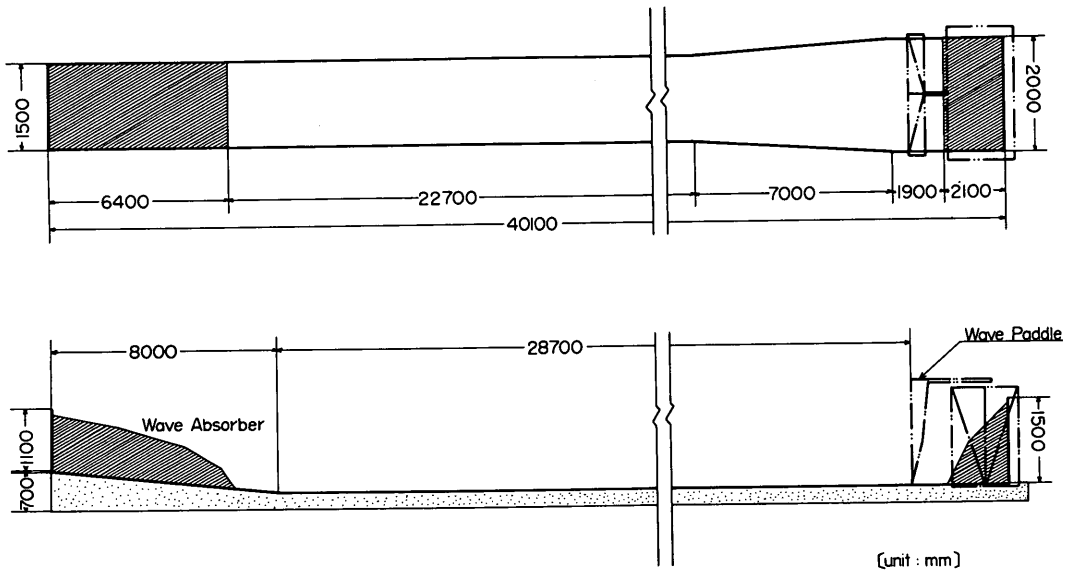


図-1 実験水路の諸元

る。このように水路幅を縮小したのは、一樣幅の水路では造波板のすぐ前面で砕波してしまて起すことができないような大きな波高の波を発生させるためである。水路縮小によって、波高は造波板すぐ前面のものより $\sqrt{2.0/1.5} = 1.15$ 倍大きくなる。

(2) 不規則波の発生機構

不規則波の発生は以下に示す手順によって行った。まず2台の白色雑音発生装置を用いて、白色雑音を発生させる。この白色雑音を、4~40 Hzの間の周波数帯を1/3 oct毎に区切った10チャンネルのバンドパスフィルターに通して、所要のスペクトル形をもつ不規則波信号を取り出す。この場合、白色雑音発生装置2台のうち1台は表-1のような中心周波数を持つ10チャンネルのバ

表-1 バンドパスフィルター

チャンネル	周波数幅 (Hz)	中心周波数 (Hz)
CH-1	4~5	4.48
CH-2	5~6.3	5.61
CH-3	6.3~8	7.10
CH-4	8~10	8.95
CH-5	10~12.5	11.2
CH-6	12.5~16	14.1
CH-7	16~20	17.9
CH-8	20~25	22.4
CH-9	25~31.5	28.0
CH-10	31.5~40	35.5

ンドパスフィルターの奇数番号、もう1台は偶数番号のバンドパスフィルター用となっている。バンドパスフィ

ルターのダイヤル設定はプログラム化されていて、有義波高、周期及び水深など必要なデータを入力すれば、ダイヤル設定値が出力されるようになっている。バンドパスフィルター通過後はすべてのチャンネルの出力信号は合成されて、所要の不規則波信号となる。この不規則波信号をデータレコーダに記録する。しかし、この信号をそのまま造波機の操作回路に入力信号として入れるには周波数が10~20倍程度高すぎる。そこでデータレコーダからこの信号を出力させる時に、データレコーダのスピ

ードを記録時の1/10あるいは1/20に落して出力させる。本実験ではテープスピードを1/20に落している。この低周波の不規則信号を造波機の入力信号として入れると、造波機の手元盤内で7.5倍に増幅されて、ミニジャモータに伝わる。ミニジャモータは信号に従って回転方向およびスピードを変える。このモータの回転と共にボールネジが回転し、ボールネジの回転が造波板を水平方向の往復運動に変換する。

このような不規則波の発生機構を図示すると図-2の

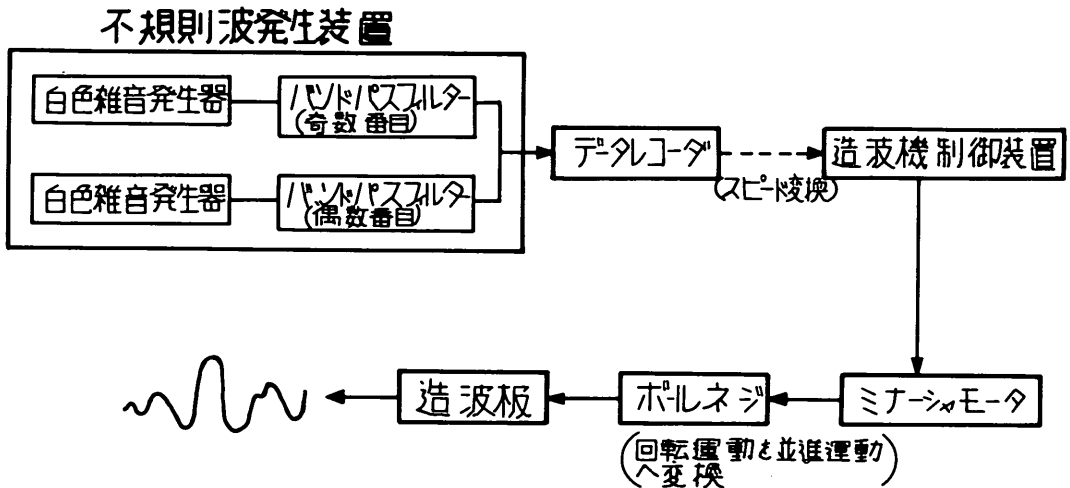


図-2 不規則波の発生機構

ようになる。

(3) 波高計と昇降装置

波高計としては容量式波高計を6台用いた。波高計の大きさと台数は波高50cm用2台、20cm用3台、10cm用1台である。50cm用2台は沖波とリーフ斜面上、20cm用3台はリーフ礁原上でリーフ先端に近い部分、10cm用は陸上部のすぐ前面に用いた。

昇降装置とは6台の波高計を検定するための装置で、スイッチ1回毎に上または下に1cmだけ波高計のセンサー部分を動かす装置である。

(4) 記録装置とA/D変換装置

波高記録装置として7チャンネルのデータレコーダ、8チャンネルのペンレコーダを用いた。ペンレコーダはモニター用、データレコーダは解析用として用いた。

データレコーダに記録された波のアナログ記録は港務

技術研究所海洋水理部の高速度A/D変換装置によって1/7.5sec毎にA/D変換され、MTに記録される。このディジタル量を用いて港湾技術研究所の大型計算機TOSBAC5600で統計解析を行った。

2.2 実験条件

(1) 現地の条件

代表的な沖縄の海岸は図-3に示すようにリーフの沖側で水深が20mから200m、この水深から海底はほぼ1/10勾配で立ち上り、水深が0mから5mになったところで水平な礁原となる。そして、この礁原の長さは500mから2,000m程度となっている。リーフ上の前部部に+1.0m程度の高さの環礁がある場合とない場合がある。また、この環礁は連続して続いている場合と不連続な場合がある。

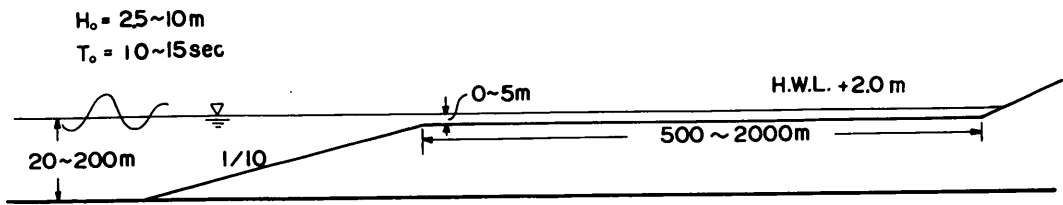


図-3 現地の条件

潮位としては H. W. L. で + 2.0 m 程度である。入射してくる沖波の波高は 2.5 m から 10 m 程度、周期は 10 sec から 15 sec 程度である。

(2) 模型縮尺

模型の縮尺を決めるうえで、本ケースの場合には次の 2 つの事項が重要な要素となる。

- a) 現地において礁原の長さが 500 m から 2,000 m もあることから判断して、模型でもできるだけ長い礁原にする必要がある。
- b) 本実験は砕波を伴った現象に関する模型実験であるから十分大きい縮尺で実験する必要がある。

a) の条件を制約された水路長において満足するためにはできるだけ小さな縮尺で実験する必要がある。一方、b) の条件では模型縮尺をできるだけ大きくしなければならない。砕波を伴う現象では模型実験における波高はできれば 10 cm 以上とるのがぞましい。

以上のように模型縮尺に関して相反する 2 つの結論が導かれる。入射波が周期の長い潮汐や津波などであれば歪模型を採用することができるが、本実験での波は風波またはうねり性の波であるからこれは採用できない。そこで、礁原の長さを最大で 1,000 m 程度、波高は最小のもので 2.5 m として、模型縮尺を 1/50 とした。この縮尺によると模型での礁原の長さは 20 m、波高は最少のもので 5 cm となる。波高は前述の制限より小さくなるが、本実験ではこの程度の波高縮少は許容できると考えた。

本実験は重力の卓越する現象を取り扱っているので、相似則として Froude の相似則を採用した。その結果、長さ及び時間の縮尺は以下ようになる。

長さの縮尺：1/50

時間の縮尺：1/7.1

現地において 20 m から 200 m にもなる水深を模型で何 cm にするかは次の問題となる。この水深を 1/50 で縮少すると、模型での水深は 40 cm から 4 m になる。しかし、水路の高さに制限があり、水深を 4 m にもすることはできない。そこで模型の水深として、入射波の波群中の最高波の砕波限界水深より深い水深をとれば、波に対

する水深の影響は浅水効果だけになって、取り扱いが容易になる。模型水深をこれによって決めるとすると、実験に用いる沖波の最も大きい波高 H_0 は現地で 10 m、模型に直して 20 cm であるから、最高波高 H_{max} を $H_{max} = 2 H_0$ として求めると、 $H_{max} = 40$ cm となる。砕波限界水深 h_b を孤立波の理論から求めると

$$h_b = H_{max} / 0.78 = 51.3 \text{ (cm)}$$

となる。現地におけるリーフ上の水深を 0.5 m、実験に用いる最低潮位を + 0.5 m とすると、リーフ上での水深は最低で 1.0 m、模型で 2 cm となる。水路底から模型リーフの天端までの高さは最低で $51.3 - 2 = 49.3$ cm 必要となる。礁原の長さをできるだけ長くすることを考えて、模型リーフの天端高を水路底から 50 cm とした。

(3) 実験ケース

リーフ上の礁原の水深は実験ケースに関係なく、-0.5 m で一定とした。潮位は H. W. L. で + 2.0 m であるから、実験潮位として + 0.5 m と + 2.0 m とした。また、暴風時の吹き寄せによる水位の上昇を考えると、波高の大きい波については + 3.0 m の水位でも実験することにした。以上のように実験水位は + 0.5 m、+ 2.0 m、および 3.0 m とした。

波浪条件については、風波の場合とうねり性の波の場合とに分けた。風波の場合は沖波の波形勾配 H_0/L_0 を 0.03 として一定に保ち、波高を 10 m から 2.5 m まで 2.5 m づつ下げた。うねりの場合は周期を 12.7 sec と一定にし、波高を 5.0 m、2.5 m に取った。その結果、現地における入射波（沖波）の諸元は表-2 の通りである。これを模型実験における沖波の諸元に換算すると表-3 のようになる。

リーフ形状としては、リーフ上先端部に環礁がない場合、高さ 1.0 m の連続環礁がある場合、また同じ高さの環礁が中央部で 15 m 幅だけ切れている場合の 3 種類とした。

リーフ上の礁原の長さとしては、模型上最大取れる長さはリーフの天端の端から測って 16 m であるので、この長さを半分にして、8 m と 16 m の長さの 2 種類を用いた。

表-2 現地沖波の諸元

波の種類 波の諸元	1の波	2の波	3の波	4の波	5の波	6の波
波高 (m)	10.0	7.5	5.0	2.5	5.0	2.5
周期 (sec)	14.6	12.7	10.3	7.3	12.7	12.7
波長 (m)	333	250	167	83	250	250

表-3 目標とする模型沖波の諸元

波の種類 波の諸元	1の波	2の波	3の波	4の波	5の波	6の波
波高 (cm)	20.0	15.0	10.0	5.0	10.0	5.0
周期 (sec)	2.07	1.80	1.46	1.03	1.80	1.80
波長 (m)	6.66	5.0	3.34	1.66	5.0	5.0

現地での礁原の長さは 400 m と 800 m となる。

リーフ上から急に深くなっているような形状の海岸も存在するので、模型の後方部をとり除いた条件でも実験を行っている。

3. 実験手順と予備実験

3.1 実験手順

(1) 波高計の配置

波高計 6 台の配置を示したのが図-4(a)と(b)である。

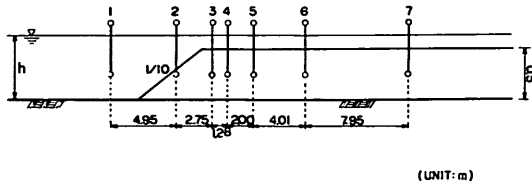


図-4(a) 波高計の設置位置

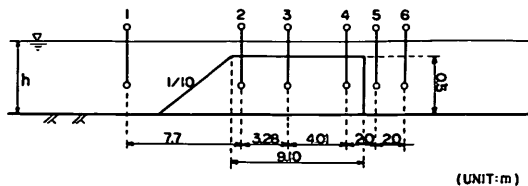


図-4(b) 急深部の模型における波高計の位置

図-4(a)はリーフが陸上部まで続いている場合、図-4(b)はリーフ上を進んだ後、急激に深くなっている場合の波高計の位置を示したものである。礁原の長さが 8 m (現地で 400 m) の場合には、図-4(a)の①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥の位置に、16m (現地で 800 m) の場合には①, ②, ③, ⑤, ⑥, ⑦の位置に波高計を設置した。①の波高計は入射波の波高を測定するためのものであり、②の波高計はリーフ前面の斜面における波の変形を調べるために設置した。礁原の先端部付近では波の変形が大きいことを予想して波高計の間隔を短くしている。

波高計の検定は水深の深い①, ②の波高計では 5 cm 間隔と大きく、リーフ上では 2~4 cm 間隔と小さくした。リーフ上では水深が浅く、検定が容易でないので、予め波高計検定箱をリーフ内にセットし、検定をし易くしている。

(2) 不規則波の設定

不規則波の設定プログラムによって得られた値に不規則波発生装置のダイヤルをセットして、所要の信号をデータレコーダに収録する。このデータレコーダを記録時の 1/20 のスピードに落して出力させ、この出力信号を造波機の制御装置に入れる。このようにして不規則波を発生させたが、目標とした波高より小さく、そのためデータレコーダの出力を直流増幅器で増幅して用いた。

まず、データレコーダに記録された信号のまゝで波を起し、有義波指示計で有義波高を測定する。小さければ直流増幅器で増幅し、所要の波高になるまで調整する。その時のダイヤルを記録しておく。このような方法で 6 種類の各波について出力ダイヤルの値を設定しておき、本実験ではこのダイヤルの数値に従って波を起した。

3.2 予備実験

3.1(2)で求めた出力ダイヤルで波を発生させて、セットした出力ダイヤルの値が妥当であるかどうかを詳細に調べることと、リーフ前面の斜面による反射率を測定することとの 2 つの目的で予備実験を行った。予備実験における模型は環礁がない場合に限った。

(1) 入射波の特性

入射波の特性を調べるために、①の位置に設置した波高計の記録から入射波のスペクトルを計算したのが図-5(a)と(b)である。図-5(a)には 1 の波, 2 の波, 3 の波のスペクトルが示してあり、図-5(b)には 4, 5, 6 の波のスペクトルが示してある。

各波のスペクトルを見てみると、どのスペクトルもピーク周波数より高周波側で明瞭な第 2 のピークを持っている。たとえば、2 の波では $f = 0.75 \text{ Hz}$ 、3 の波では

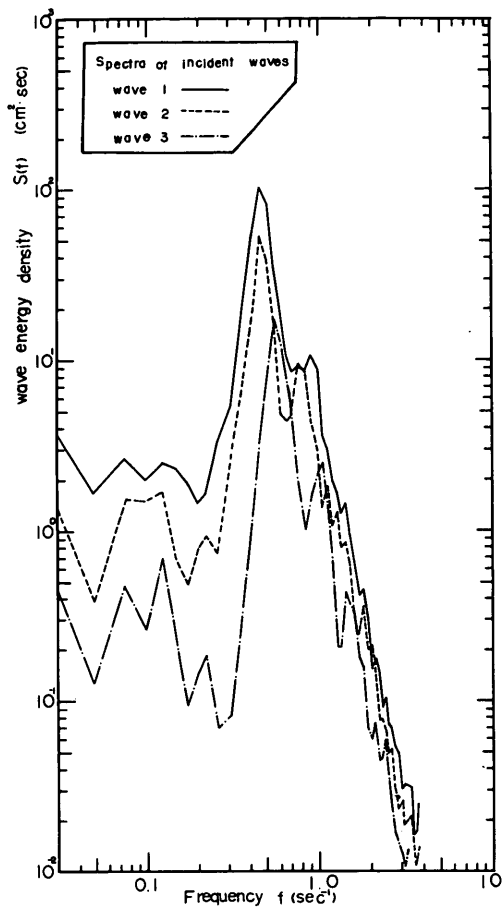


図-5(a) 入射波のスペクトル (1, 2, 3の波)

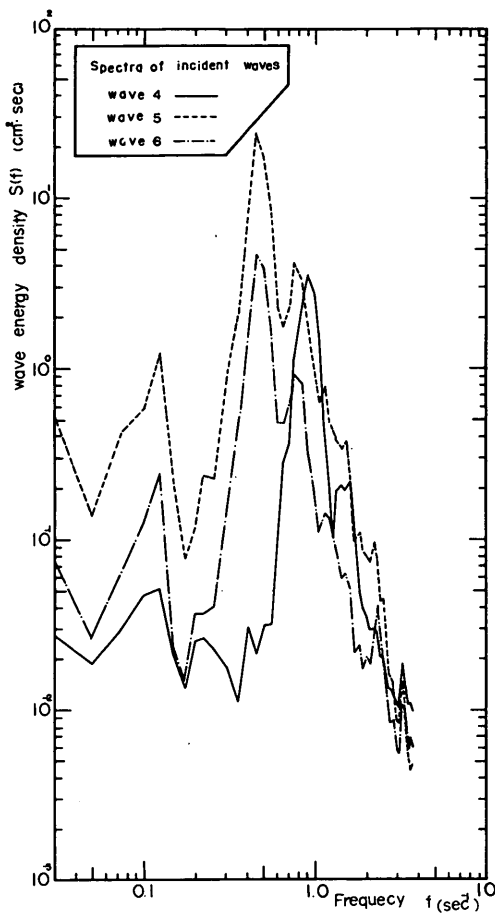


図-5(b) 入射波のスペクトル (4, 5, 6の波)

$f = 1.12 \text{ Hz}$ で第2ピークを示している。第2ピークの現われる周波数は必ずしもピーク周波数の整数倍付近にあるわけではなく、そのため第2のピークは波の非線型干渉によって生じたものではなく、不規則波発生器の特性によるものと推測される。不規則波発生装置の特性を調べた結果、従来の状態と異なることがわかった。

しかし、もし不規則波の発生装置を調整するとなると多大の時間を要し、実験計画上問題が生じるので今回は一応このスペクトルを持つ波で実験することにした。第2ピークの値はピーク値の1/10程度と小さいことから考えて、リーフ上の波の変形には大きな影響を与えないと

表-4 実験に用いた沖波の諸元

波	1		2		3		4		5		6	
	H_0' (cm)	T_0 (sec)	H_0' (cm)	T_0 (sec)	H_0' (cm)	T_0 (sec)	H_0' (cm)	T_0 (sec)	H_0' (cm)	T_0 (sec)	H_0' (cm)	T_0 (sec)
52	19.0	2.16	13.5	2.01	9.7	1.64	3.8	1.08	9.3	1.99	4.8	1.98
55	19.9	2.14	14.1	2.01	10.1	1.63	4.0	1.09	9.8	1.99	5.0	1.96
57	21.1	2.15	15.9	2.02								

予想される。

また波形記録からゼロアップクロス法で算定した各入射波の諸元を示すと、表-4のようになる。入射波の諸元は目標とした波の諸元に近く、スペクトル形での問題

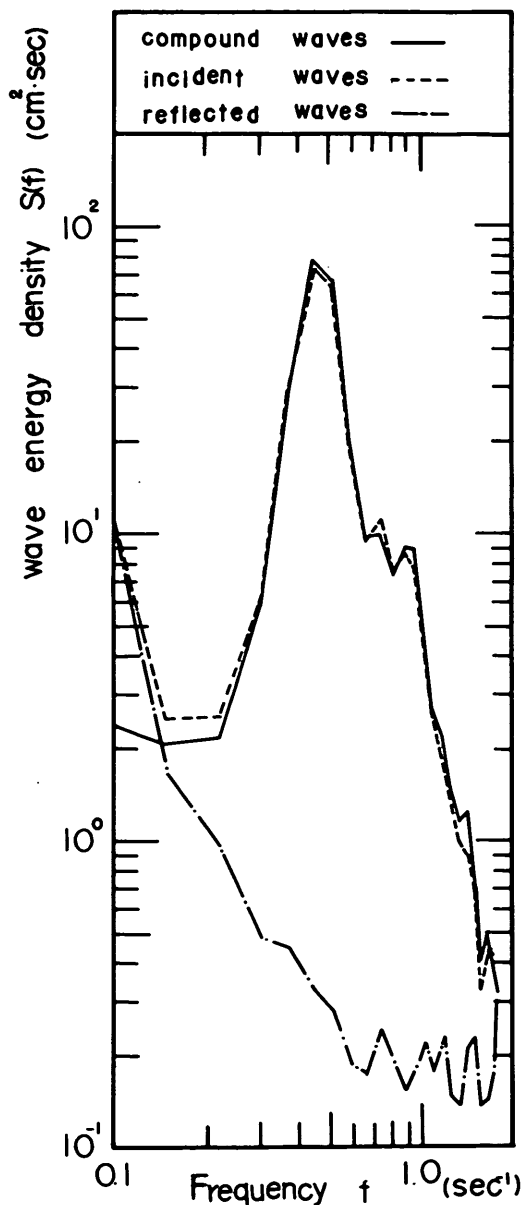


図-6 合成波、入射波および反射波のスペクトル

を考えなければほぼ妥当な入射波の諸元であるといえる。

(2) リーフ斜面の反射率

①の波高計の位置に20cmだけ離してもう一台の波高計を設置し、リーフ斜面による反射率を算定した。反射率はこの2台の波高計の波形記録から入射波と反射波に各成分波を分離し、入射波と反射波の全エネルギーの比のルートで与える。これを数式で表わすと、不規則波の反射率 K_r は次式で与えられる。

$$K_r = \sqrt{\int_0^\infty S_r(f)df / \int_0^\infty S_i(f)df} \quad (1)$$

ここに、 $S_r(f)$ は反射波のスペクトル、 $S_i(f)$ は入射波のスペクトルである。

反射波と入射波の分離計算については参考文献(4)に詳しく述べられている。

図-6は1の波に対する合成波、入射波および反射波のスペクトルを示したものである。各成分波の反射率を調べてみると、低周波側と高周波側で入射波の成分波に対する反射波の成分波の比率が大きくなっていて、反射率が高くなっていることがわかる。しかし、全般に反射波のエネルギーは小さい。表-5に示すように計算された

表-5 1/10斜面の反射率

波の種類	H_0'/L_0	反射率
1の波	0.0261	0.148
2の波	0.0214	0.155
3の波	0.0231	0.145
4の波	0.0209	0.146

反射率は波の種類によってほとんど変わらず、平均値で0.149である。このように反射率が小さいことから図-4の①の位置で測定した波高を入射波の波高と考えるとそれほど大きな相違はないことがわかる。

4. 波の変形

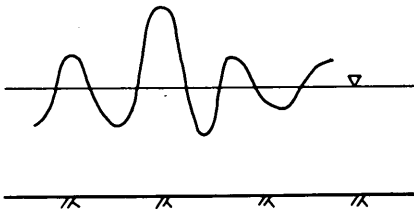
4.1 定性的な波の変形

浅いリーフによる波の変形過程は海岸工学上非常に興味ある問題であるばかりでなく、海岸保全上重要な問題となっている。そこで、実験によって得られた波の変形の特性を定量的に解析する前に、非常に興味ある変形を示す波の特性について述べる。

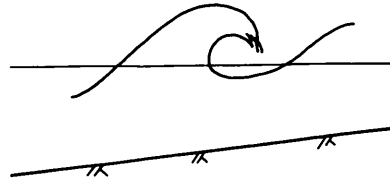
入射してくる不規則波はリーフ前面の1/10勾配斜面でまず砕波し、砕波後の波は一波一波段波状になってリ-

フ上を進行する。この段波は肩の部分で崩れているため波高は次第に減衰する。これと同時に段波状の波形は次第に変形し始め、段波の肩の部分に凹凸ができ、波が分

裂し始める。波がリーフ上を伝播するにつれてこの凹凸が大きくなり、波の分裂が明確になってくる。この波の変形過程を図示すると、図-7 のようになる。図-7 の(a)



(a) Irregular incident waves



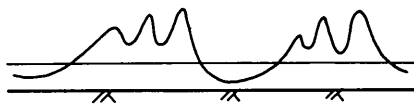
(b) wave breaking of plunger type



(c) bore due to wave breaking



(d) Initial stage of wave separation (appearance of soliton)



(e) Wave separation

図-7 波の定性的変化

は一様水路部での不規則波を示している。(b)はこの不規則波が斜面上で砕波する状態を示す。この時の砕波形式はほとんど巻波による砕波である。 ξ_0 を次式で定義する。

$$\xi_0 = \tan \alpha / H_0 / L_0 \quad (2)$$

ここに、 $\tan \alpha$ は斜面の勾配であり、 H_0 と L_0 はそれぞれ沖波の波高と波長である。

Galvin⁵⁾はこの ξ_0 が砕波形式を分類するパラメータだとして、この ξ_0 を用いて砕波形式を以下のように分類している。

崩れ波 (spilling breaker) : $\xi_0 > 3.3$

巻き波 (plunging breaker) : $0.5 < \xi_0 < 3.3$

寄せ波 (surging) : $\xi_0 < 0.5$

これは規則波による実験をもとにしたものであるが、 H_0 、 L_0 に不規則波の沖波の諸元を入れて ξ_0 を計算してみ

ると本実験の範囲では $0.6 \leq \xi \leq 1.0$ で巻き波になることがわかる。

このように巻き波状態で砕波した波がリーフ上に乗ると図-7の(c)に示すような段波状態で進む。この段波の峰の前面では波は砕けている。この状態が飛行機からリーフ海岸を見下した場合に白く砕波して見える部分に相当する。この波がさらにリーフ上を進行すると(d)のような状態に移り、段波が分裂し始め、ソリトン

(Soliton)が発生する。このソリトンは水深波長比が0.1以下の場所で発生し易く、リーフ上の水深は非常に小さく、現地では0.5m程度であるから、リーフ上ではこのようなソリトンの発生が現実に行っていると考えられる。

波の進行とともに波の分裂は明瞭になり、(e)のような形へ移行する。この状態ではまだ元の波の上に分裂したソリトンが乗っている状態であるが、これがさらに進行すると、ソリトンは一波一波として観測され、元の波のエネルギーは分裂したソリトンへ移行してしまふことが予想される。

このような波の変形は波の非線型性によるものであって、波の非線型性のパラメータであるUrsel数 U_r ($= \frac{H}{2} L^2 / h^3$) が1より大きいと非線型性が強くなり、 $U_r \gg 1$ では前述のような波の分裂が発生する。室田・岩田^{6),7)}は段波の変形について研究を行い、Solitonの分裂機構を明らかにしている。Zabusky・Galvin⁸⁾は $U_r = 777$ である場合の波について実験を行ない、波の分裂を観測すると同時に、非線型波の変形方程式である KdV 方程式を用いて数値計算を行ない実験値と比較している。また、岩崎・真野・小杉⁹⁾は孤立性段波のソリトン分裂について実験を行ない、Solitonの反射や波圧についても言及している。その他、このソリトンについては数多くの研究があるが、まだ、ソリトンの分裂や変形の特性についてはよくわかっていない。

リーフ上の波の変形のように波の分裂が発生する問題ではソリトンの特性の研究が必要となってくる。本模型実験では不規則波を使用していることもあって、波の特性が非常に複雑であるため、ソリトンの分裂特性にまで言及するに至らなかった。

4.2 波の変形特性

(1) 波のスペクトル変化

図-8(a)~(c)および図-9(a)~(c)はそれぞれ礁原の長さが8m(現地で400m)と16m(現地で800m)の場合のスペクトルの変化図を示したものである。どの図も水深55cm(潮位+2.0m)で、(a), (b), (c)の図は1の

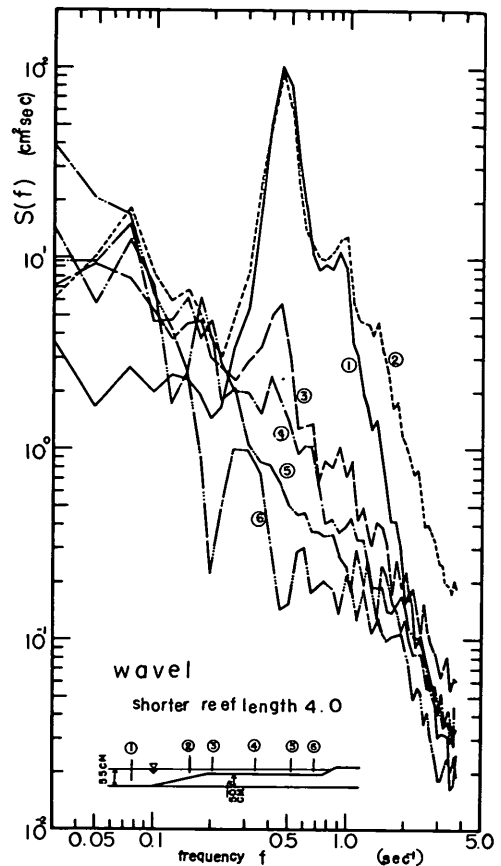


図-8(a) 1の波のスペクトル変化(潮位+20m)

波、4の波および6の波スペクトル変化を示している。波高の大きい1の波の場合(図-8(a), 図-9(a)), リーフ前面の斜面上ではピーク周波数付近の波のエネルギーは減少するが、低周波側と高周波側では逆にエネルギーが増大する。リーフ上に波が乗り上げた直後では、入射波のピーク周波数($f = 0.4 \text{ Hz}$ 付近)で、入射波の1/20程度ではあるが、まだかなりのエネルギーを持っている。低周波側のエネルギーは斜面上の場合とそれ程大きな変化は示さない。一方、高周波側($f > 1.0 \text{ Hz}$)では斜面上で一時増大したエネルギーはリーフ上に乗ると急激に小さくなる。 $f > 2.0 \text{ Hz}$ では入射波のエネルギーとほぼ等しいか少し大きい程度である。さらに波が進行すると、つまり波高計番号④、⑤では低周波側から高周波側へと f^{-1} にほぼ比例してエネルギーが減少する。陸上部前面では、波のエネルギーは低周波側から $f = 0.4 \text{ Hz}$ まで急激に下がり、 $0.4 \text{ Hz} < f < 2.0 \text{ Hz}$ では少

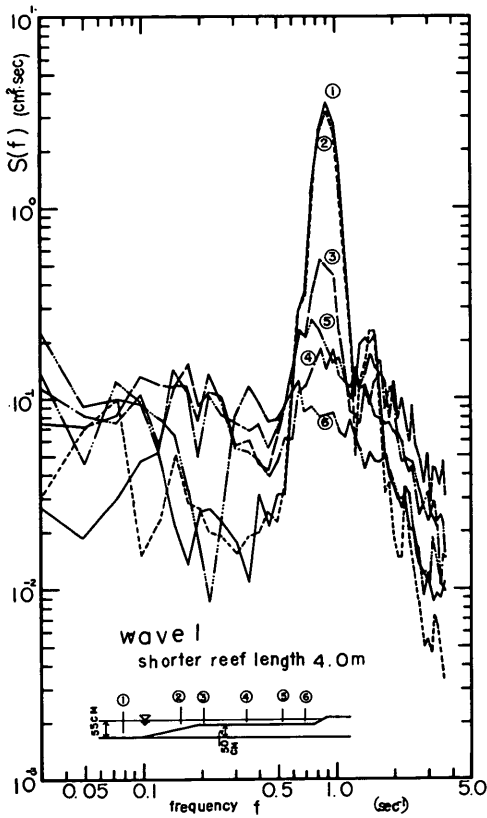


図-8(b) 4の波のスペクトル変化(潮位+2.0m)

し下がり気味ではあるが、ほとんどフラットに近い。 $f > 2.0\text{Hz}$ ではほぼ入射波のエネルギーに等しい。

図-8(b)と図-9(b)は沖波波形こう配は $H_0'/L_0 \approx 0.03$ と、1の波とほとんど同じであるが、波高が1の波の1/4程度で5 cmの波である。この波では斜面上でもピーク周波数付近($f = 0.9\text{Hz}$)の波のエネルギーが少し減少するだけでほとんどスペクトル形に変化はない。リーフ上の先端部では、低周波側と高周波側の波のエネルギーが増大し、ピーク周波数付近では入射波の1/4程度の波のエネルギーになる。さらに波が進行した地点では低周波側から $f < 1.5\text{Hz}$ までほぼ一様なエネルギーを示し、white noise のような形になる。しかし、 $f > 1.5\text{Hz}$ は f^{-2} にほぼ比例して下がる。陸上部前面では、極端にエネルギーの下がる周波数があるが、この点を除けばほぼ一様なエネルギー分布を示す。エネルギーの下がる点は礁原の短い図-8(b)では $f = 0.22\text{Hz}$ に現われ、礁原の長い図-9(b)では $f = 0.31\text{Hz}$ および

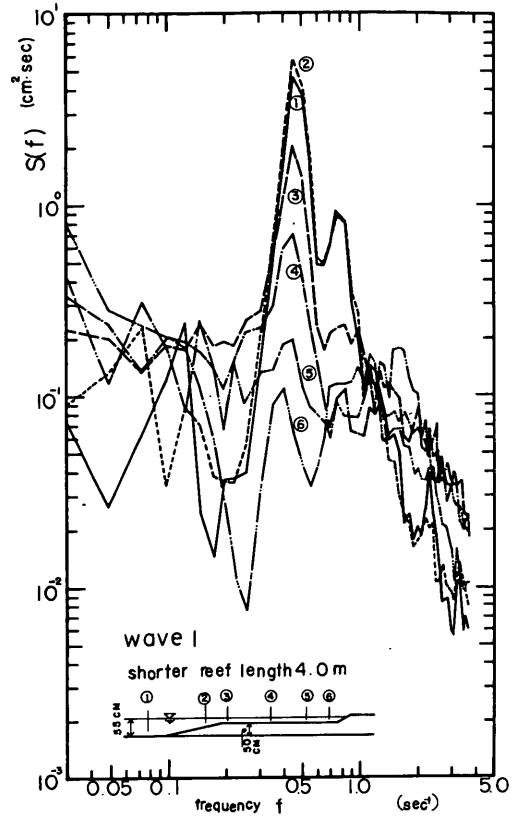


図-8(c) 5の波のスペクトル変化(潮位+2.0m)

$f = 0.7\text{Hz}$ で現われる。このような点の現われる原因は解明できなかった。

図-8(c)と図-9(c)は沖波波形こう配の小さい波で、 $H_0'/L_0 = 0.01$ 程度である。しかし、4の波より低周波のエネルギーが大きいことを除けばスペクトルの変形は4の波の場合とそれ程大きな相違はない。

以上の結果、礁原の長さによってスペクトルの変形状態は大きな変化を示さない。スペクトル形には沖波波形こう配より波高水深比が大きな影響を与え、波形こう配は長周期の変動を励起しているようにみえる。

さらにスペクトルの変形を水深 $h = 52\text{cm}$ (潮位+0.5 m) および $h = 57\text{cm}$ (潮位+3.0 m) についても調べてみたが図-8、9の場合とほとんど同じ傾向を示した。また、リーフ上前面に高さが2 cm (現地で1.0 m) の環礁があってもなくてもスペクトル形の変形には影響はなかった。図-10は環礁がある場合の図で、図-9(a)に

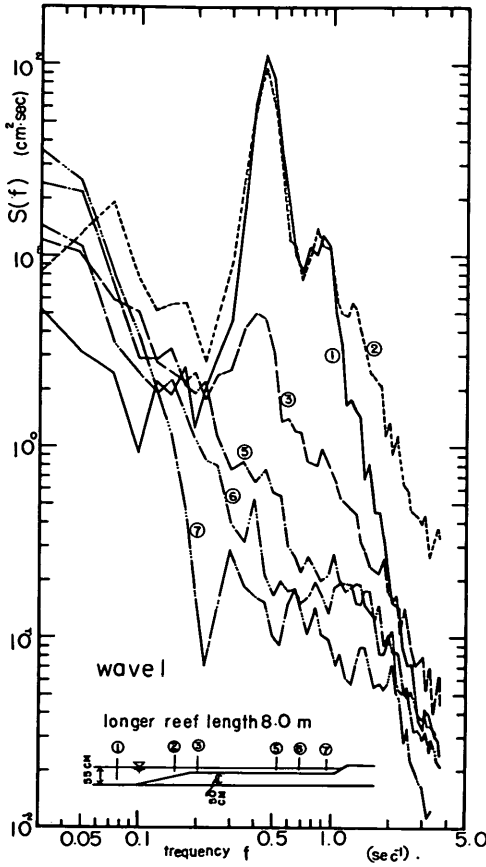


図-9(a) 1の波のスペクトル変化(潮位+2.0m)

対応するが、両者の間には顕著な差がないことがわかる。

図-11はリーフ上に乗り上げた波が模型リーフ上を9.1 m(現地で約450 m)進んで再度水深の深い場所に侵入する場合のスペクトル形の変化を示したものである。沖側の波およびリーフ上の波のスペクトル形は図-9(a)の対応する地点の波のスペクトル形とほぼ同じ形を示すが、急激に再度深くなった地点(⑤、⑥)のスペクトルは低周波側($f < 0.2 \text{ Hz}$)と高周波側($f > 1.0 \text{ Hz}$)で高いエネルギーを示し、その中間($0.2 \text{ Hz} < f < 1.0 \text{ Hz}$)でエネルギーが小さいという独特な形を示す。⑤と⑥ではほぼ同一のスペクトル形を示し、両者の間には顕著な差はない。低周波側のエネルギーはリーフ上のものより小さくサーフビートの振幅は減少している。また、高周波側ではリーフ上のものとほぼ同じエネルギーであり、水深が急変してもこの領域の波のエネルギーは減少しないことを示している。中間周波数のエネルギーが他に比して

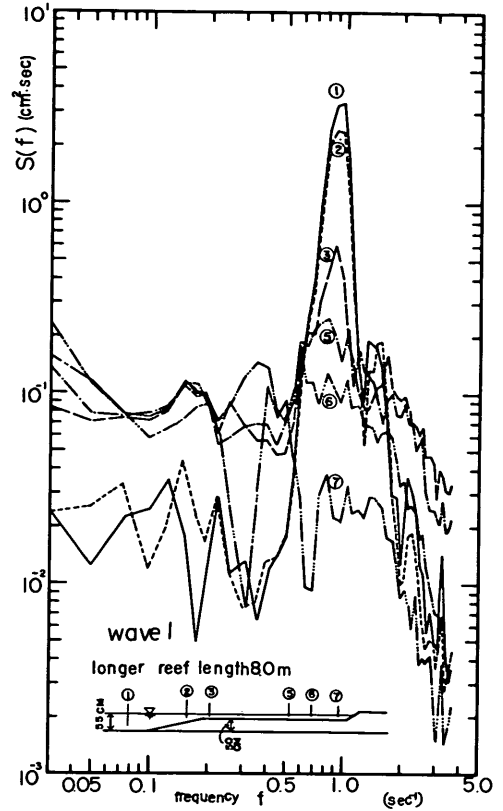


図-9(b) 4の波のスペクトル変化(潮位+2.0m)

小さいことは⑤、⑥の地点では波長の長い波の上に小さな波長の波がのっているという状態を示している。

(2) 波高分布の変化

図-12(a)~(f)は環礁のない場合の各測点での波高分布形の一例を示したものである。スペクトルの変形で述べたようにスペクトル形は同一の波では水深(潮位)によってその形を大きく変えることはないという実験結果から判断して、各水深(潮位)における各測点での平均波高を用いて波高分布を求め、これらの波高分布の平均分布として、図-12は表わされている。横軸は平均波高に対する波高比、縦軸は波の生起確率密度である。また、これらの図中の実線の曲線はレーリー分布を示している。

図-12(a)は沖水深における入射波の波高分布である。入射波の波高分布は非常によくレーリー分布に乗っていることがわかる。図-12(b)は斜面上の波高分布を示している。平均波高付近の波高の生起確率は少し小さくなっ

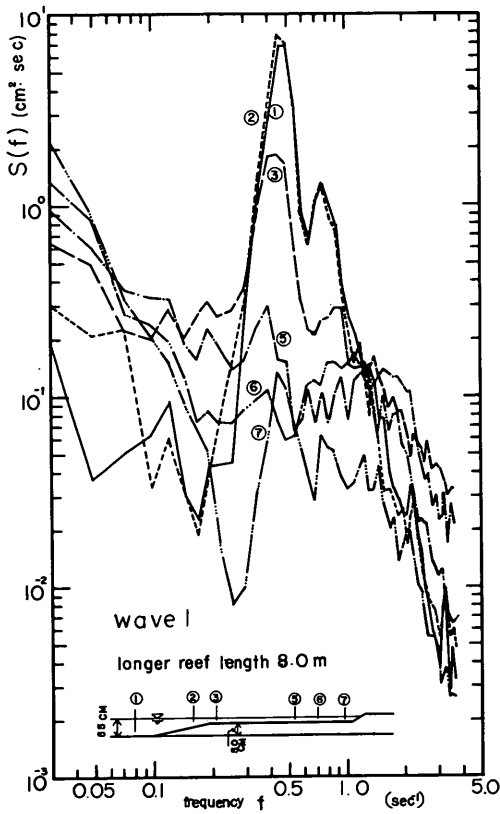


図-9(c) 5の波のスペクトル変化(潮位+2.0m)

ているが、ほぼレーリー分布に近い分布形である。図-12(c)はリーフ上先端部付近の波高分布図である。この地点でも斜面上の分布形図-12(b)とほとんど変わらず、レーリー分布に近い。さらにリーフ上の奥へ進むと、図-12(d)では $0.5 < H/\bar{H} < 1.0$ の範囲の生起確率は大きくなり、 $1.0 < H/\bar{H} < 2.0$ の波高の生起確率は小さくなる。また、 $H/\bar{H} > 2.0$ では波高の生起確率は増大する。さらにリーフの奥では図-12(e)に示されているように $H/\bar{H} = 1.0$ 付近の波高の割合が増大し、 $H/\bar{H} = 2.0$ 付近の波高の生起確率は減少する。波高比の大きい波が増大し、 $H/\bar{H} = 3.75$ にもなる大きな波高の波が現われる。陸上部のすぐ前の地点では、図-12(f)のようにこの傾向はさらに強まる。この点では $H/\bar{H} > 4.0$ の波も出現する。このような波高分布形の変化には、サーフビートの影響やソリトンの出現とその成長による

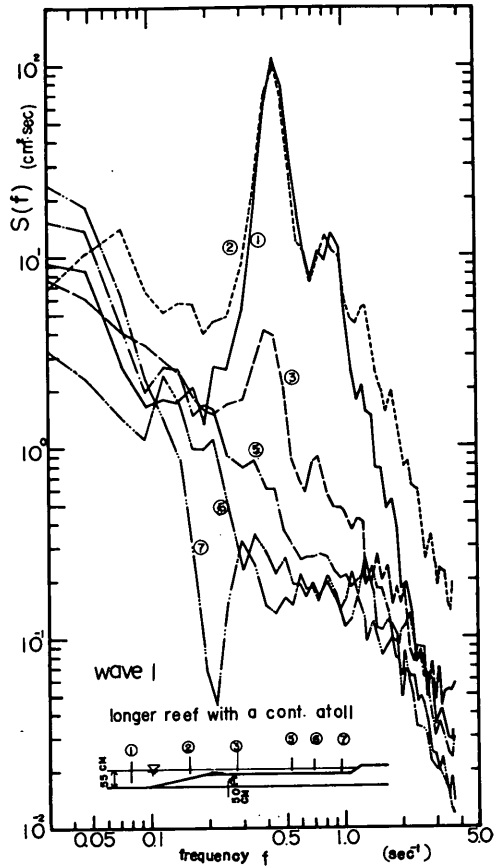


図-10 環礁がある場合の1の波のスペクトル変化

影響が入っていると思われるが、その影響についてよくわからなかった。リーフ上の点では、その置点の平均波高よりもかなり大きい、つまり $H > 3.5 \bar{H}$ の波も出現し、レーリー分布から非常にずれている。合田がサーフビートを考慮して計算した波高分布に近い。このことはリーフ上では顕著なサーフビートが現われていることを示している。

H_{max} と $H_{1/3}$ の比を調べてみると、リーフ上の各置点で異なった値を示すが、その平均値の傾向を調べてみると以下ようになる。リーフ前面の沖波では $H_{max} = 1.5 \sim 1.6 H_{1/3}$ 、リーフの斜面上では沖波とほぼ同じで $H_{max} = 1.6 \sim 1.7 H_{1/3}$ 、リーフに波が乗り上げた地点でも斜面上とほぼ同じ値を示す。リーフ上を波が進行するにつれて、この比は次第に大きくなり、陸上部前面では $H_{max} = 1.8 \sim 2.1 H_{1/3}$ となる。

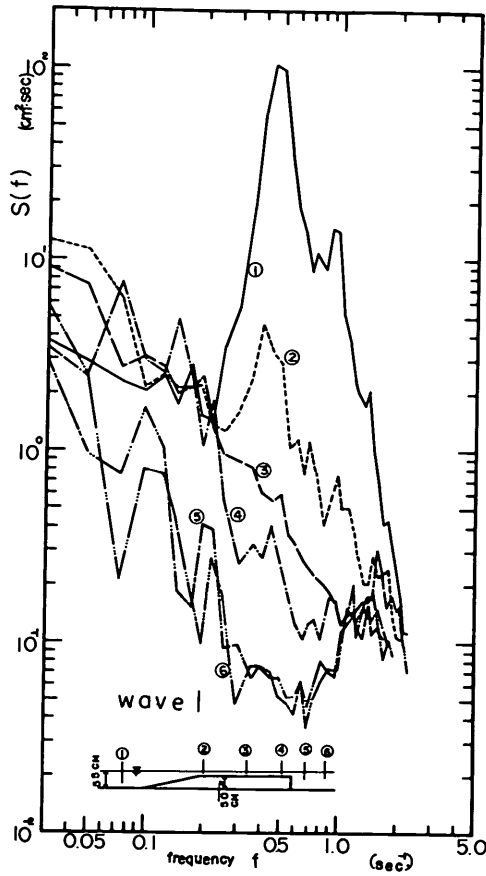


図-11 急深部の存在する場合の1の波のスペクトル変化

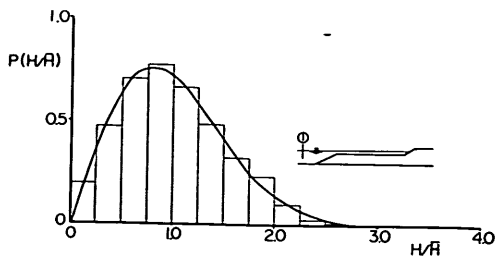


図-12(a) 環礁なし模型の波高分布 (波高測点①)

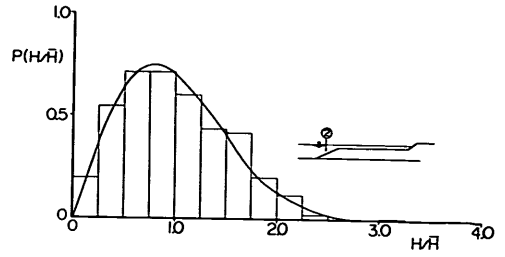


図-12(b) 環礁なし模型の波高分布 (波高測点②)

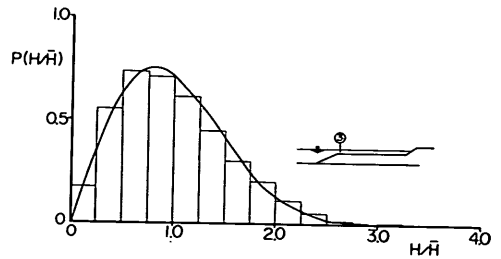


図-12(c) 環礁なし模型の波高分布 (波高測点③)

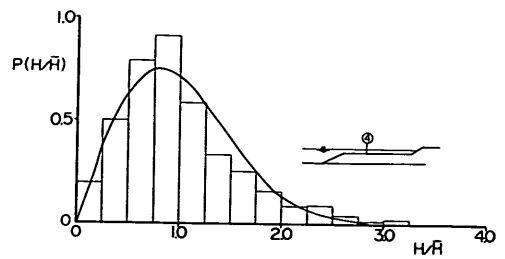


図-12(d) 環礁なし模型の波高分布 (波高測点④)

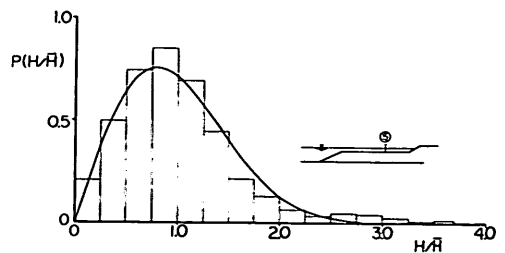


図-12(e) 環礁なし模型の波高分布 (波高測点⑤)

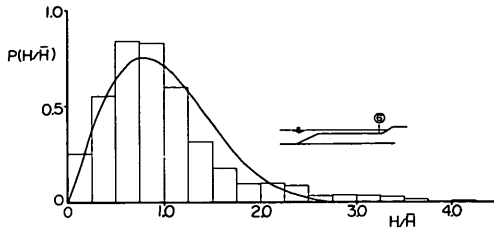


図-12(f) 環礁なし模型の波高分布 (波高測点⑥)

(3) 波高の変化

波高の測点における有義波高を換算沖波波高に対する比で示したのが図-13~15である。礁原の長さによって各測点での有義波高が大きく変わることはないため、礁原の長い場合と短い場合とを一諸にして、その平均値で

波高を示した。横軸は、礁原の沖側端を原点とし、陸上方向を正に取った距離 x と換算沖波波高 H_0' との比を示す。

図-13(a), (b), (c)は環礁なしリーフモデルにおける、それぞれ潮位+0.5 m, +2.0 m, +3.0 mの場合の波高変度を示したものである。これらの図からわかるように、 x/H_0' が-20から40の範囲で波高は急激に減少し、それ以後ゆっくり減少しながら一定値に近づくような傾向を示す。例えば、潮位+2.0 mの3の波を考えてみると、 $x/H_0' = -22$ で $H_{1/3}/H_0' = 0.97$ であったものが $x/H_0' = 8$ では $H_{1/3}/H_0' = 0.42$ まで下がる。さらに、 $x/H_0' = 21$ では $H_{1/3}/H_0' = 0.32$, $x/H_0' = 42$ では $H_{1/3}/H_0' = 0.26$, $x/H_0' = 82$ では $H_{1/3}/H_0' = 0.24$, $x/H_0' = 164$ では $H_{1/3}/H_0' = 0.21$ と波高の低下率は x/H_0' が大きくなるほど小さくなる。次に、2の波について各潮位

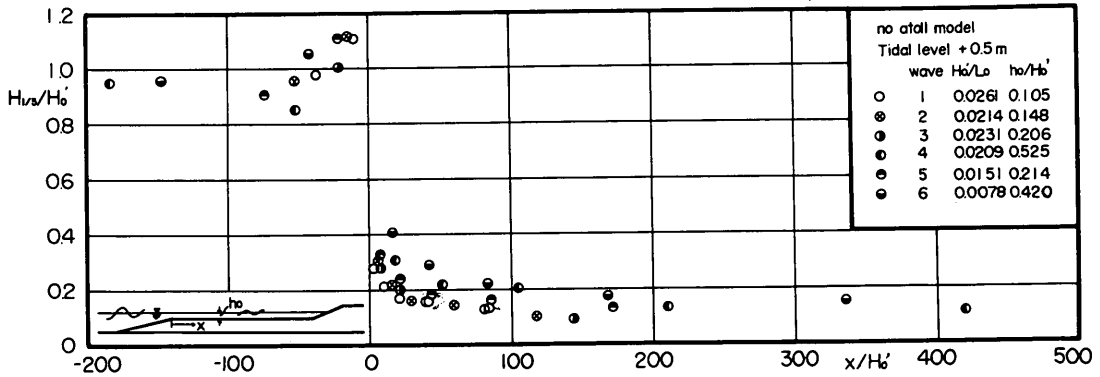


図-13(a) 環礁なしリーフ上の波高変化 (潮位+0.5 m)

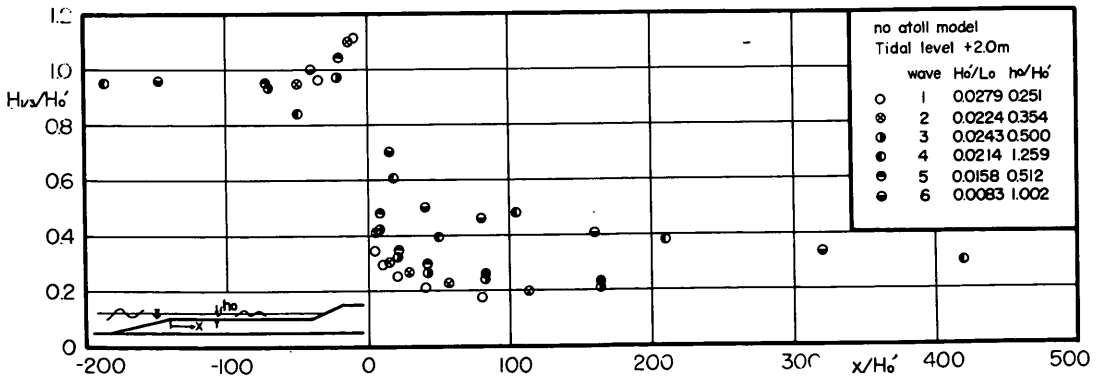


図-13(b) 環礁なしリーフ上の波高変化 (潮位+2.0 m)

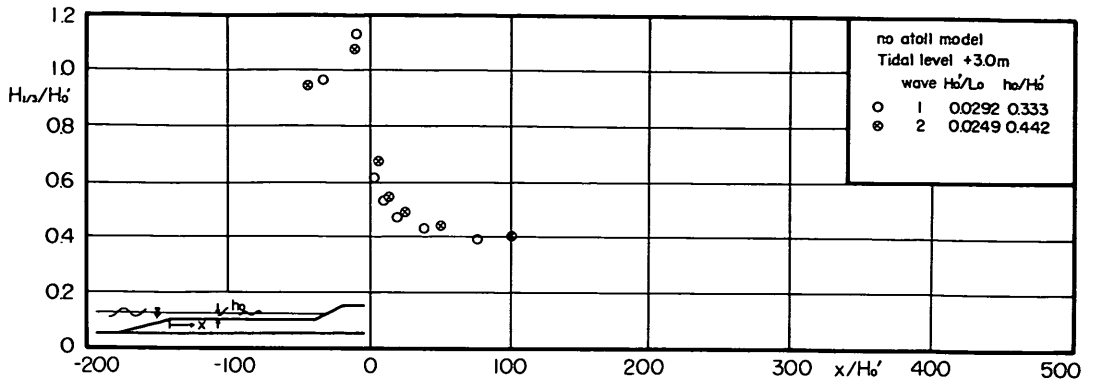


図-13(c) 環礁なしリーフ上の波高変化 (潮位+3.0 m)

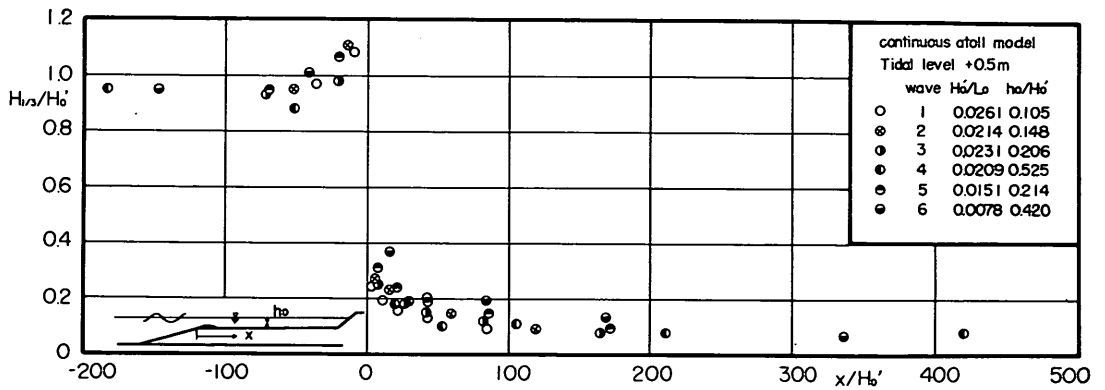


図-14(a) 連続環礁リーフ上の波高変化 (潮位+0.5 m)

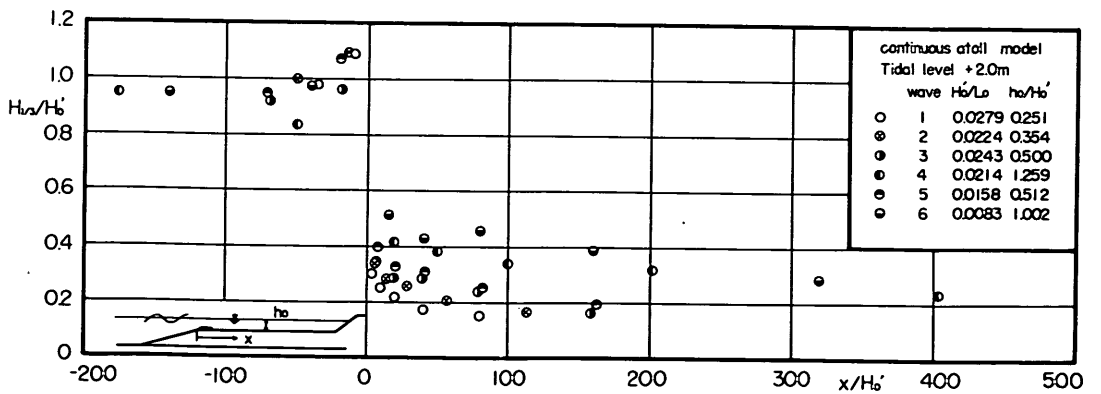


図-14(b) 連続環礁リーフ上の波高変化 (潮位+2.0 m)

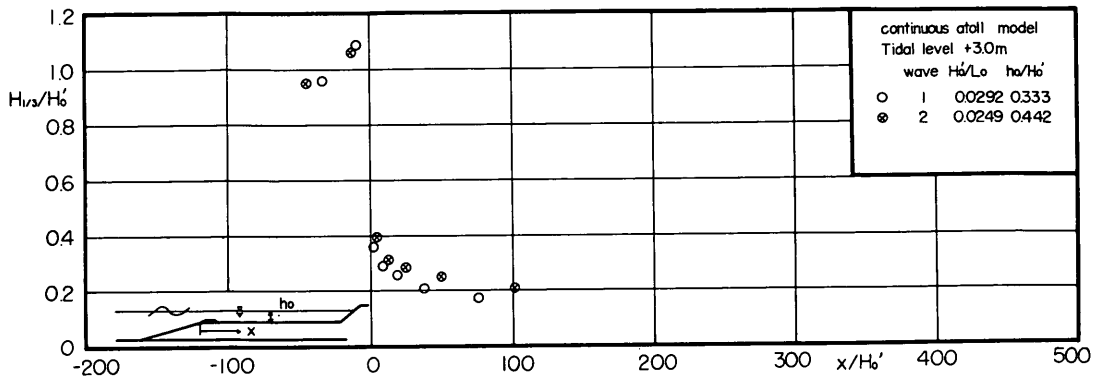


図-14(c) 連続環礁リーフ上の波高変化 (潮位+ 3.0 m)

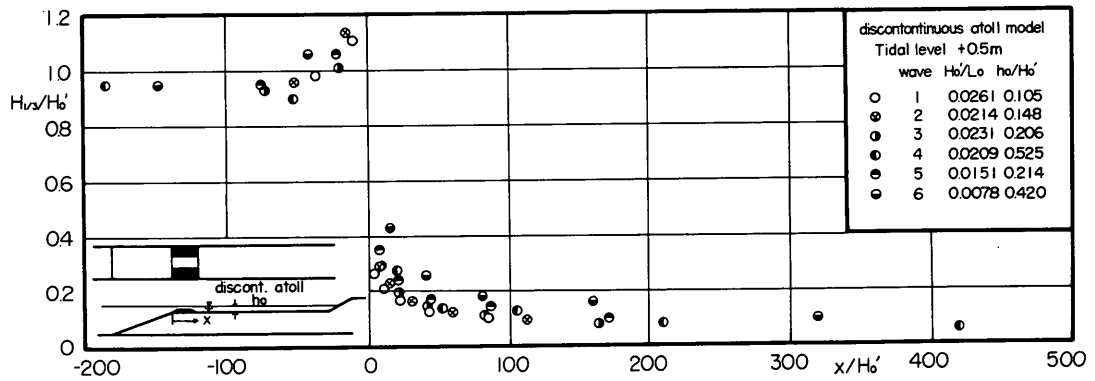


図-15(a) 不連続環礁リーフ上の波高変化 (潮位+ 0.5 m)

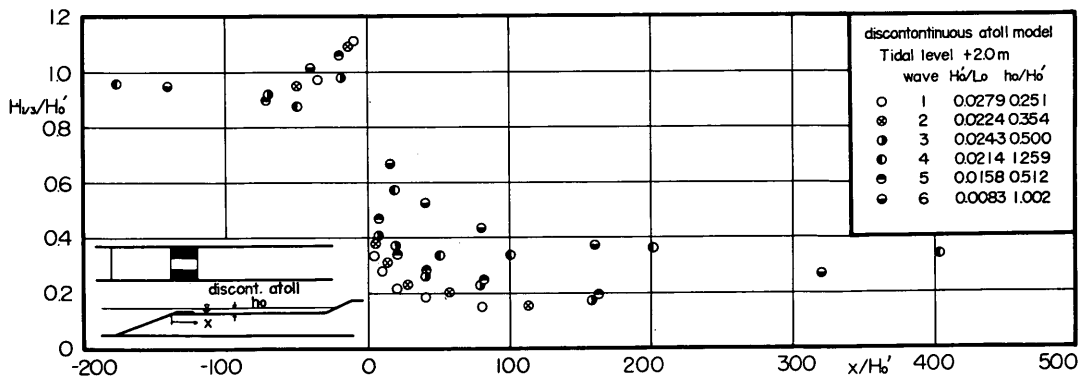


図-15(b) 不連続環礁リーフ上の波高変化 (潮位+ 2.0 m)

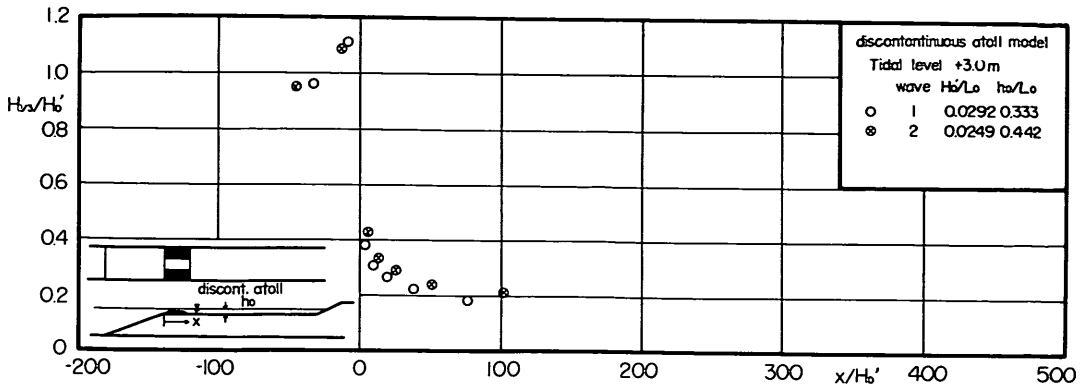


図-15(c) 不連続環礁リーフ上の波高変化 (潮位+3.0 m)

での波高を比較してみると、各潮位で波形勾配 H_0'/L_0 は少し異なるが、 $0.0214 \leq H_0'/L_0 \leq 0.0249$ であり、ほぼ同一の波形勾配とみなすことができるにもかかわらず、 $x/H_0' = 5$ では潮位 0.5 m で $H_{1/3}/H_0' = 0.31$ 、潮位 + 2.0 m で $H_{1/3}/H_0' = 0.41$ 、潮位 + 3.0 m で $H_{1/3}/H_0' = 0.67$ となる。また、 $x/H_0' = 14$ では、潮位 + 0.5 m で $H_{1/3}/H_0' = 0.22$ 、潮位 + 2.0 m で $H_{1/3}/H_0' = 0.30$ 、潮位 + 3.0 m で $H_{1/3}/H_0' = 0.54$ となる。各地点の波高は潮位によって、つまり h_0/H_0' の値によって大きく変わり、 h_0/H_0' が大きいほど波高減衰は小さい。このことは、同一波形勾配でも h_0/H_0' が小さいほど波高減衰が大きいことを示している。また、 h_0/H_0' がほぼ同一の値を示す 3 と 5 の波を比較してみると、潮位に関係なく、波形勾配が小さい波が波高減衰も小さいことがわかる。

連続環礁のある場合の模型 (図-14(a), (b), (c)) や不連続環礁の場合の模型 (図-15(a), (b), (c)) もほぼ環礁

なしの場合について述べたことと同じ傾向を示す。

次に環礁なしリーフ上を模型で 9.1 m (現地で約 450 m) 波が進んだ後、急激に深くなりリーフ沖水深に一致する場合の実験結果を図-16(a), (b), (c) に示す。図中に示された斜めの線は水深が深くなった領域の値を示している。これらの図からわかるように、水深が急激に深くなると波高は急激に減少する傾向を示す。この傾向は同一波形勾配では h_0/H_0' にほとんど関係せず、また、同一 h_0/H_0' では波形勾配の小さいものほどこの傾向が強いようにみうけられる。図-13(a) と 図-16(b) において 3 の波について比較してみると、 $x/H_0' = 6.8$ では、前者で $H_{1/3}/H_0' = 0.28$ および後者で $H_{1/3}/H_0' = 0.24$ 、 $x/H_0' = 35 \sim 40$ では前者で $H_{1/3}/H_0' = 0.16$ 、 $x/H_0' = 70 \sim 80$ では後者で $H_{1/3}/H_0' = 0.9$ および後者では $H_{1/3}/H_0' = 0.95$ となってほぼ同じ値をリーフ上では示す。水深の急変による波高減衰は、最大で $H_{1/3}/H_0' = 0.05$ 程度である。10m の沖波波高では最大 50 cm 程度水深急変によ

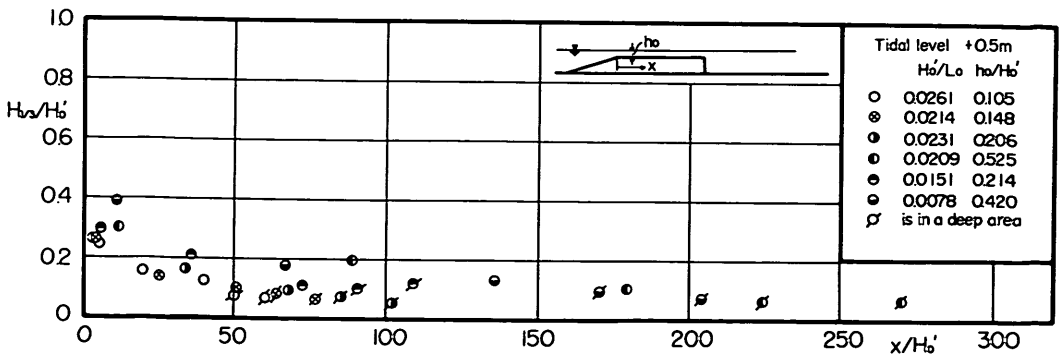


図-16(a) 急深部のリーフにおける波高変化 (潮位+0.5 m)

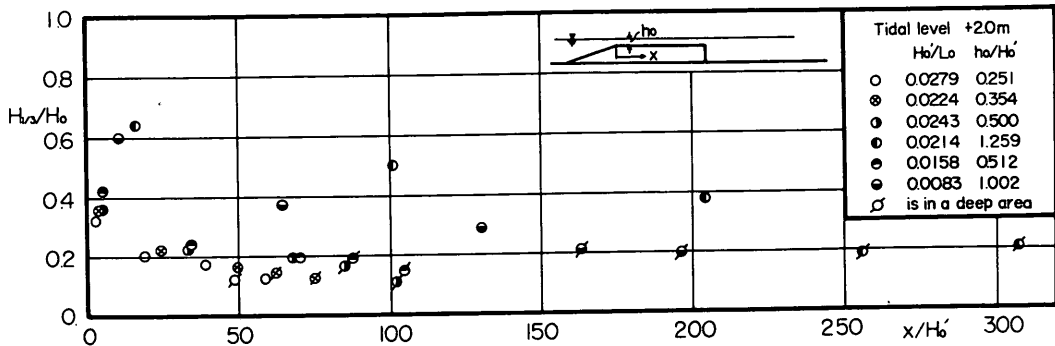


図-16 (b) 急深部のリーフにおける波高変化 (潮位+2.0 m)

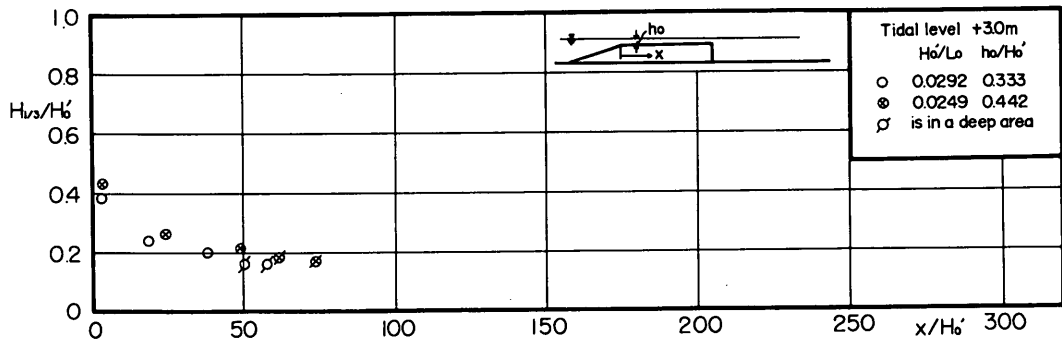


図-16 (c) 急深部のリーフにおける波高変化 (潮位+3.0 m)

って波高が下がることになる。水深が急変する前の波高が小さいので、水深変化前と変化後では最大で1/3程度の波高減少となり、水深変化に伴う減少は大きいことがわかる。

(4) 周期の変化

各測点の有義波周期と沖波周期の比の一例を示したの

が、図-17~20である。周期比はリーフ上の礁原の長さによって大きくかわり、そのため礁原の短い場合と長い場合の平均値を用いることはできなかった。図-17~19はそれぞれ環礁なし、連続環礁あり、不連続環礁ありの礁原の長い場合の周期比を示したものである。潮位は+2.0 mである。これらの図から、陸上部すぐ前面では周期比

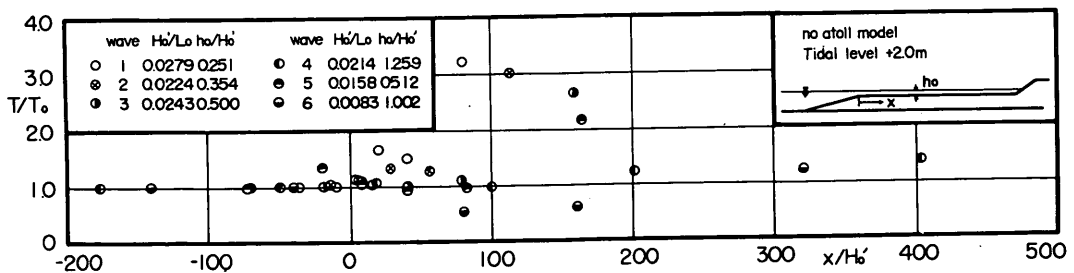


図-17 環礁なしリーフ上の周期比の変化 (潮位+2.0 m)

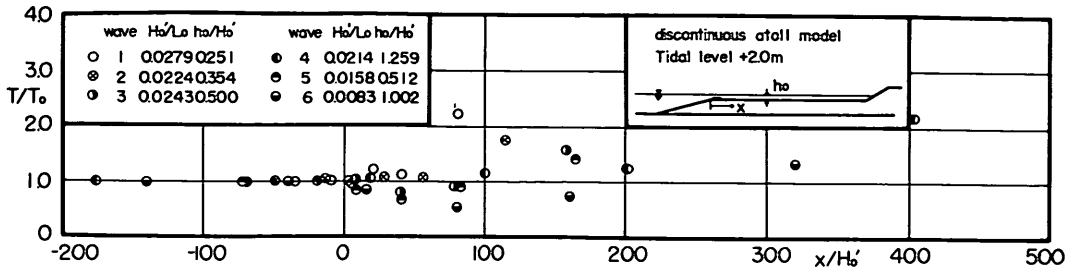


図-18 連続環礁リーフ上の周期比の変化 (潮位+2.0 m)

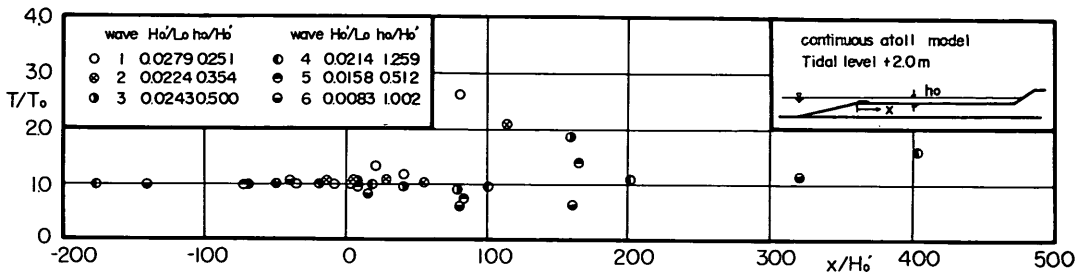


図-19 不連続環礁リーフ上の周期比の変化 (潮位+2.0 m)

は 1.0 以上になり、3.0 以上になる場合もある。一方、リーフ上の点では波の条件によっては 0.5 付近まで下がる場合もある。このように周期比については一般的な傾向がなく、波の条件の少しの変化によって大きく異なるけれども、陸上部すぐ前面では周期はかなり大きくなるようである。これはリーフ上におけるサーフビートの振幅が陸上部

すぐ前面で最大となることによって生じるものと思われる。

5. 平均水位の変化およびサーフビート

5.1 平均水位の変化

図-20~22に平均水位の上昇量 $\bar{\zeta}$ を換算沖波波高 H_0'

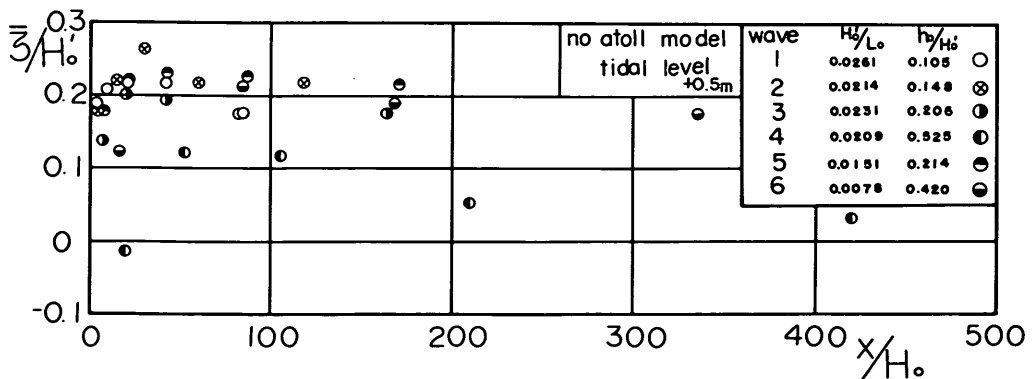


図-20(a) 環礁なしリーフ上の平均水位の変化量 (潮位+0.5 m)

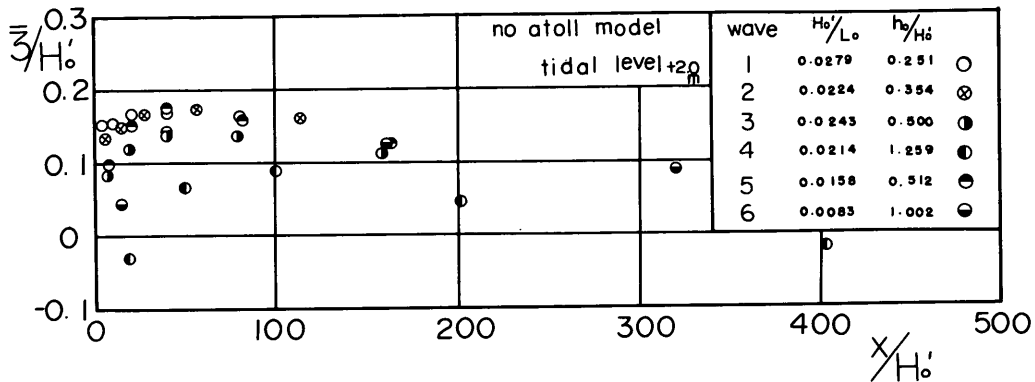


図-20(b) 環礁なしリーフ上の平均水位の変化量 (潮位+2.0 m)

に対する比で示している。平均水位の上昇量としては計測時間約10分間の平均水位の静水面からの変動量で示している。ただし、リーフ上で平均水位が上昇すると、沖側の平均水位は低下するので、各測点の平均水位の上昇量に沖側の平均水位の低下量を加えて補正している。

図-20~22はそれぞれ環礁なし、連続環礁あり、不連続環礁ありのケースである。各図の(a), (b)図は潮位+0.5 m, +2.0 mの場合のものである。

図-20(a), (b)をみると、平均水位は $x/H_0' = 0$ の点ではすでにある程度上昇しており、リーフ上でも少しずつ上昇する。ある地点で最大の水位になり、それ以降は減少する。この傾向はすべての波について同じである。ただし、最大水位は波高が大きい波ほど x/H_0' が小さい地点に現われる。また、同一の h_0/H_0' では波形勾配が小さいほど x/H_0' が大きくなる。たとえば、図-20(a)で3

の波と5の波を比較してみると、両者はほぼ同一の h_0/H_0' の値であるにもかかわらず、 $x/H_0' = 8$ では、それぞれ $x/H_0' = 0.14$ および 0.18 となっていて、5の波が0.04程度大きい。また、同一の波形勾配では、 h_0/H_0' が大きい程 \bar{z}/H_0' は小さくなることは、リーフ上の水深を大きくしてゆくと、波の変形はなくなって、平均水位は増減しなくなるということからも類推できる。潮位が+0.5mから+2.0mになることによって、 \bar{z}/H_0' の最大値は、1の波で0.05、2の波で0.07、3の波で0.05、4の波は0.02、5の波では0.07、6の波で0.05程度下がる。平均的に0.05程度下がるとみなしてよいであろう。

図-21(a), (b)をしてみると、環礁があることによって、リーフ上内に堆積した水は出にくくなり、潮位+0.5 mの場合、平均水位は環礁なしの場合よりも x/H_0' が0.1程度大きくなる。しかし、潮位が+2.0 mの場合には環

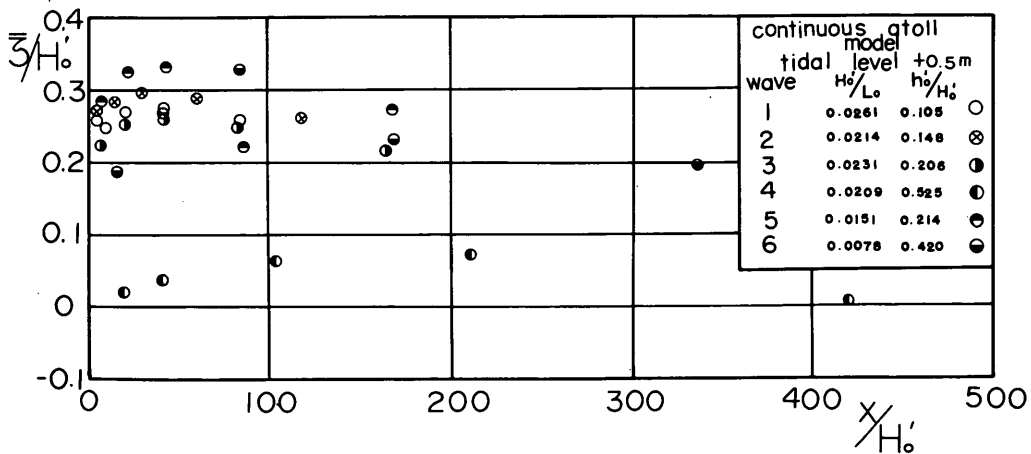


図-21(a) 連続環礁リーフ上の平均水位の変化量 (潮位+0.5 m)

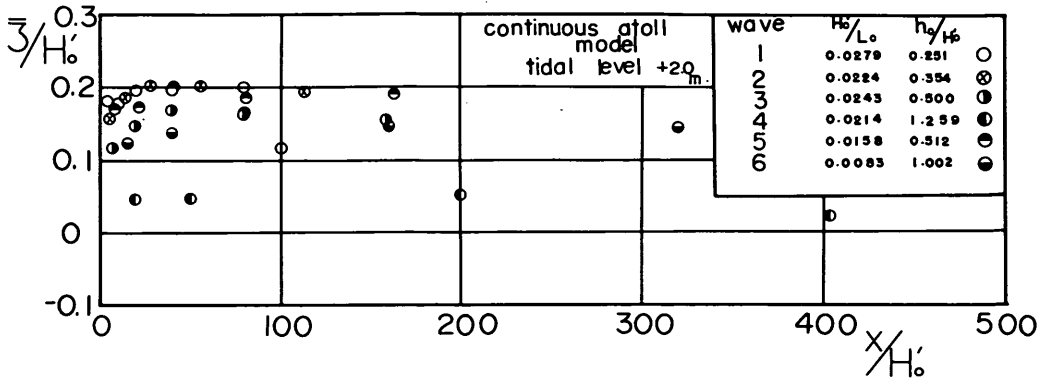


図-21(b) 連続環礁リーフ上の平均水位の変化量 (潮位+2.0 m)

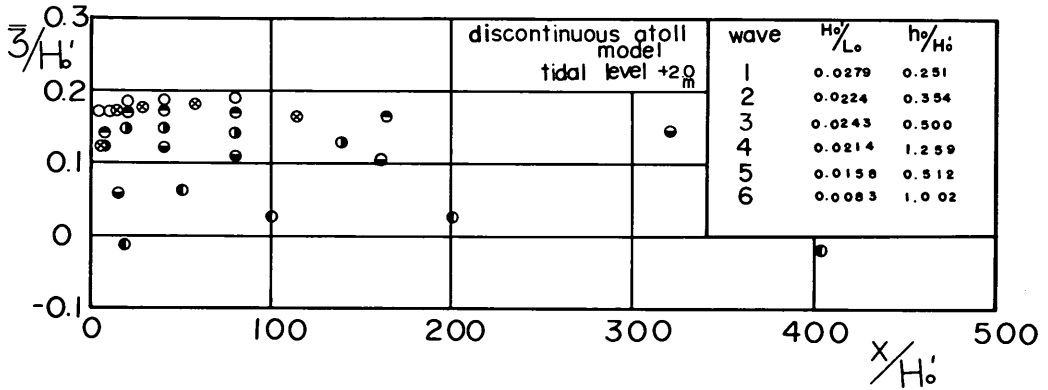


図-22(a) 不連続環礁リーフ上の平均水位の変化量 (潮位+0.5 m)

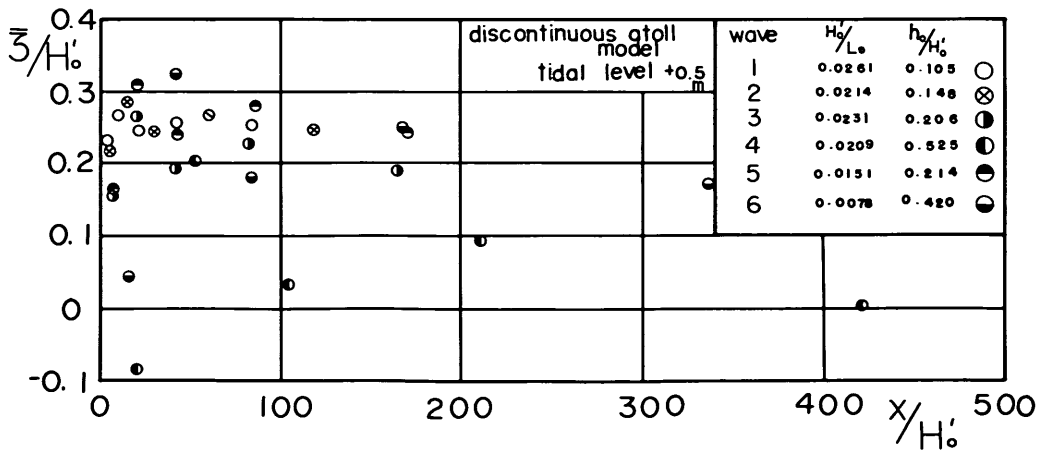


図-22(b) 不連続環礁リーフ上の平均水位の変化量 (潮位+2.0 m)

礁なしの場合より ζ/H_0' が平均的にみて 0.05 しか大きくなく、潮位 + 0.5 m の場合の半分程度である。同一 h_0/H_0' では波形勾配が小さいものほど平均水位の上昇量が大きいことは、環礁なしの場合と同じであるが、潮位 + 0.5 m で 3 の波と 5 の波を比較してみると、波形勾配の小さい 5 の波が 0.1 程度も大きくなっている。この値は環礁なし模型での値の 2 倍程度大きな差となっている。潮位 + 2.0 m の場合は 5 の波が 3 の波より 0.05 程度しか大きくない。つまり、潮位の増大によって波形勾配の影響は小さくなる。

図-22(a), (b) の不連続環礁の場合、ほぼ連続環礁の場合と環礁なしの場合の中間に存在する。潮位 + 0.5 m の場合、環礁なしの図-20(a) の値より平均的に見て 0.05 程度大きく、潮位 + 2.0 m の場合は図-20(b) の値より 0.02 程度しか大きくない。水位上昇量の傾向は環礁なしの場合とほぼ同じである。

平均水位が最大値を示した後はその直は次第に低下すると環礁なしリーフのところで述べた傾向はすべてのケースについていえる。波高変化のところで示したように平均水位の減少する箇所では波高が増加する傾向はみられず、このため平均水位が減少する理由が明らかでないが、1 つ考えられるのは、平均水位の上昇した分だけ圧力差が生じ、水が模型リーフの隙間から流れ出すことによると考えられる。

リーフ上で水深が急激に深くなっているケースについては、水位上昇による過剰水圧によって水が流れ出す傾向が強まると予想されたため、解析は行わなかった。

5.2 サーフビート

長周期の水位変動については、Munk¹⁰⁾ が最初に定量的観測を行って、この変動をサーフビートと名付けた。Tucker¹¹⁾ も英国の Newfoundland 沿岸でサーフビートを観測している。1962 年には Longuet-Higgins と Stewart¹²⁾ が Radiation stress の概念の導入して、サーフビートの発生機構を説明している。この他に多くの人が研究あるいは観測を行っている。このような研究成果を考慮した上で、合田¹³⁾ は次のようにサーフビートの発生機構を要約している。「不規則な波群中では波高の不規則性のために Radiation stress に起因する平均水位の空間的な変動が隣りしており、波が海岸に寄せて砕けると、波とともに入射した平均水位の変動が長周期波となって反射される。このため海岸近くには長周期波の定常波が形成され、平均水位の動揺として観測される。」

合田はさらに現地海岸でサーフビートを観測し、次のような関係式を求めている。

$$\frac{\zeta_{rms}}{(\zeta_{rms})_0} = \frac{0.04}{\sqrt{\frac{H_0'}{L_0} \left(1 + \frac{h}{H_0'}\right)}} \quad (3)$$

ここで ζ_{rms} はサーフビートの rms, $(\zeta_{rms})_0$ は沖波の rms, H_0' は換算沖波波高, L_0 は沖波の波長, h は水深である。

リーフ上のサーフビートが式(3)と一致するかどうか調べてみたのが図-24~29 である。これは解析結果の一例を示したものである。これらの図から分るように、環礁があって潮位 + 0.5 m の場合を除いて非常によく実験値と一致している。この環礁があって潮位 + 0.5 m の場合には、環礁の山が丁度水面と一致するような条件にあり、これがサーフビートを小さくした原因だと考えられたけれども、どのような理由によるかは明らかにできなかった。

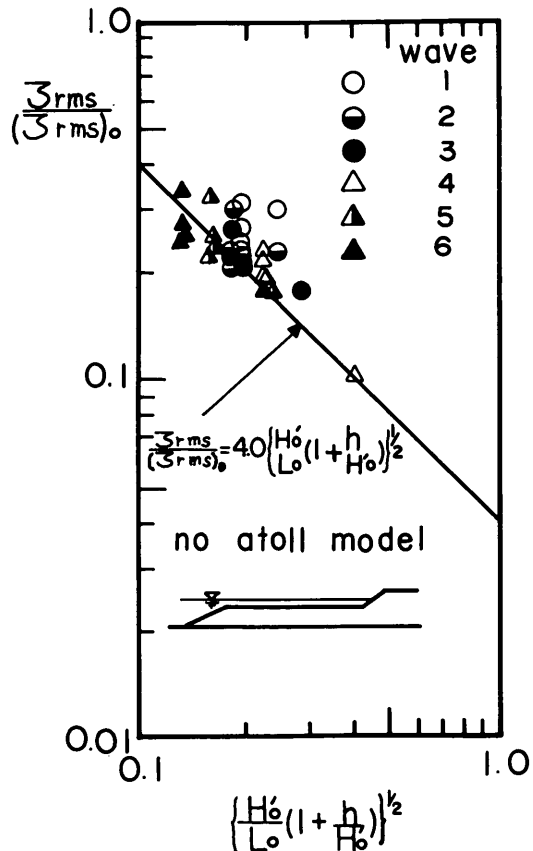


図-23 環礁なしリーフ上のサーフビート (潮位 + 0.5 m)

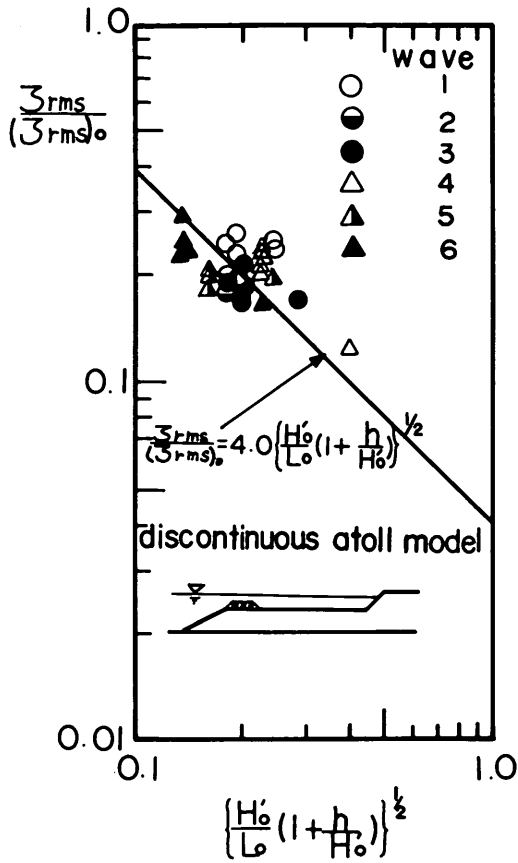


図-24 連続環礁リーフ上のサーフビート (潮位+0.5m)

サーフビートによる平均水位の変動が次式で示されるような正規分布形をずらすとして、合田は波の碎波変形の計算にサーフビートの効果を導入している。

$$P(\zeta) = \frac{1}{2\pi\zeta_{rms}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta}{\zeta_{rms}}\right)^2\right] \quad (4)$$

ここに、 ζ はサーフビートによる水位変動量である。

式(3)で示されたサーフビートの強さは、護岸の越波量などに大きな影響を与えると思われるが、どの程度の影響を与えるかについては、模型実験によって判断する必要がある。

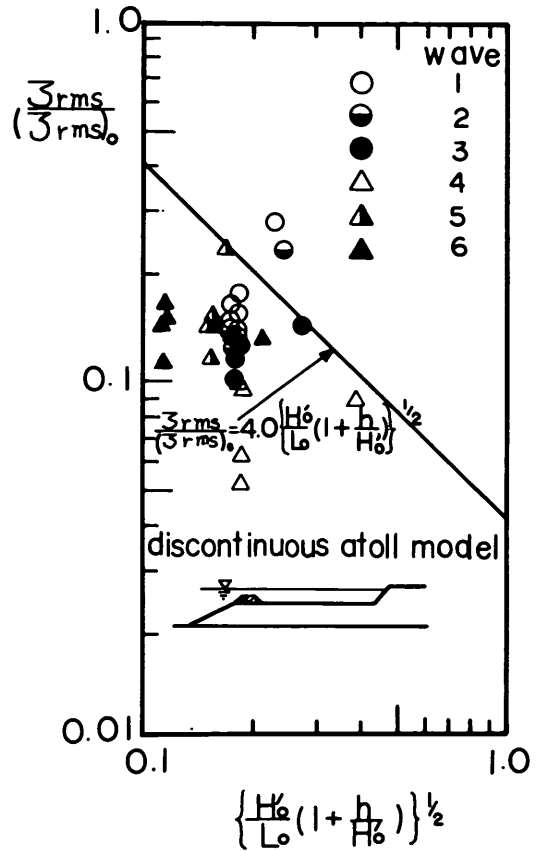


図-25 不連続環礁リーフ上のサーフビート (潮位+0.5m)

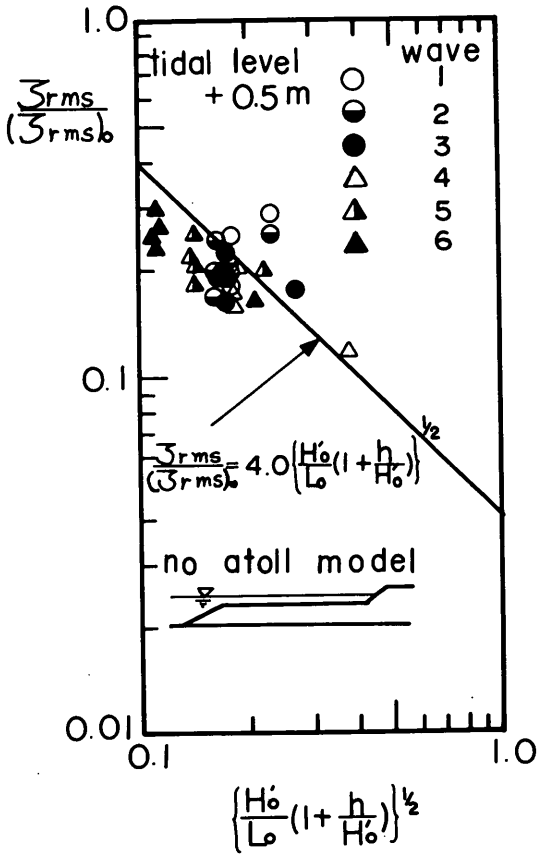


図-26 環礁なしリーフ上のサーフビート (潮位+2.0m)

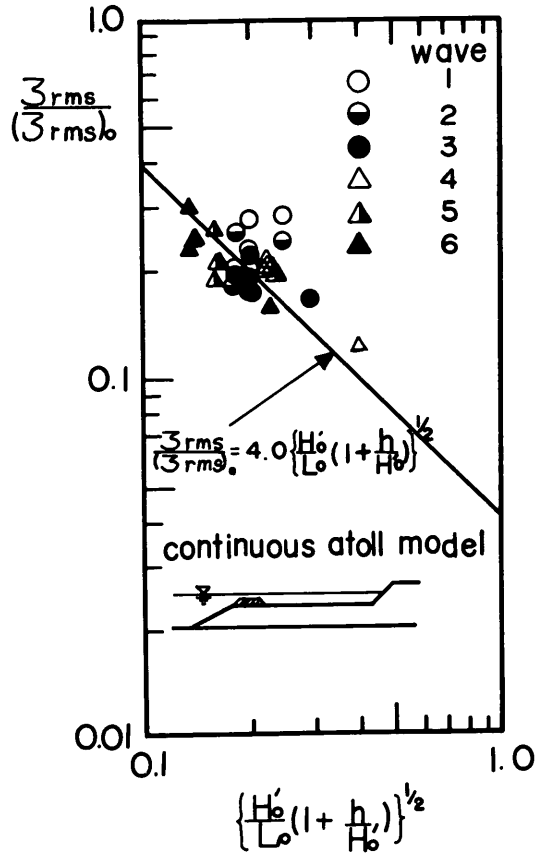


図-27 連続環礁リーフ上のサーフビート (潮位+2.0m)

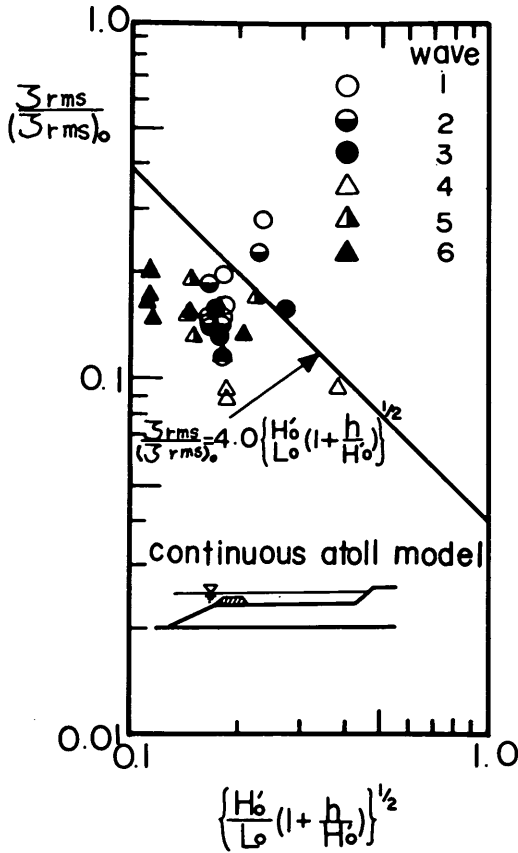


図-28 不連続環礁リーフ上のサーフビート (潮位+2.0 m)

6. 実験式による波高変化と水位上昇

6.1 実験式の誘導

4.あるいは5.で示した実験結果からつぎのようなことがわかった。

- 1) 波高は斜面上で最大の波高を示し、リーフ上の先端付近で急激に減少する。さらにリーフ上を進むと波高の減少は次第に小さくなり、一定値に近づく傾向を示す。
- 2) 潮位あるいは h_0/H'_0 が大きくなれば、リーフ上の波高減衰は小さくなる。
- 3) 同一の h_0/H'_0 では波形勾配が小さいほど波高減衰は小さくなる。
- 4) 斜面上で上昇した水位はリーフ上でも増大し、ある地点で最大値を示す。さらにリーフ上の奥に入ると

平均水位は減少する。この減少は模型堤体の継ぎ目あるいは側壁との間から堆積した水が流水するためだと考えられる。

この結果から次のように考えてることによって、環礁なしの場合の波高変化および平均水位の上昇量の算定式を導く。

リーフ上の先端より沖側 ($x < 0$) では合田による次のような碎波変形の簡略式を採用する。

$$H_{1/2}/H'_0 = k_s \quad (h/L_0 \geq 0.2)$$

$$= \min\{(\beta_0 + \beta_1 \frac{h}{H'_0}), \beta_{\max}, k_s\}$$

$$(h/L_0 < 0.2) \quad (5)$$

ここに、 k_s : 非線型線を考慮した浅水係数

$$\beta_0 = 0.028 (H'_0/L_0)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5}\theta]$$

$$\beta_1 = 0.25 \exp[4.2 \tan\theta]$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H'_0/L_0)^{0.29} \exp[2.4 \tan\theta]\}$$

$\min\{ \}, \max\{ \}$ はそれぞれ $\{ \}$ 内の最小値および最大値を示す。 $\tan\theta$ は水底勾配である。

リーフ上での波高変化は x が無限大になった地点では波高は一定値に近づくと考え、次式を仮定する。

$$H_{1/2}/H'_0 = B \exp[-A \frac{x}{H'_0}] + \alpha \frac{h_0 + \eta_\infty}{H'_0} \quad (6)$$

ここに、 h_0 はリーフ上の静水深、 η_∞ は $x = \infty$ での平均水位の上昇量である。 B, A, α は定数である。式(6)の中にサーフビートによる影響項も導入することが必要であるが、導入することによって式は複雑になり、計算には電子計算機を必要とするようになる。精度などを考慮に入れて、サーフビートによる影響項ははずした。

また、平均水位の上昇量は計算のRadiation stressと平均水面勾配との釣合いから、リーフ上では

$$\frac{d\eta}{dx} = -\frac{1}{\eta + h_0} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{8} \overline{H^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh_0}{\sinh 2kh_0} \right) \right] \quad (7)$$

で与えられるが、リーフ上では水深が小さく $kh_0 \ll 1$ であるため、式(7)は次のように書き直せる。

$$\frac{d\eta}{dx} = -\frac{3}{16} \frac{1}{\eta + h_0} \frac{d}{dx} \overline{H^2} \quad (8)$$

$\overline{H^2} = \beta H_{1/2}^2$ として、式(8)を積分すると、

$$\frac{\eta + h_0}{H'_0} = \sqrt{C_0 - \frac{3}{8} \beta \left(\frac{H_{1/2}}{H'_0} \right)^2} \quad (9)$$

となる。合田によると $\beta = 0.56$ となる。 C_0 は積分定数である。

h_0 が十分小さければ、式(5)はリーフ上先端 ($x = 0$) で

$$\frac{H_{1/2} x=0}{H'_0} = \beta_0 + \beta_1 \frac{h_0}{H'_0} \quad (10)$$

となるから、 $x=0$ での波高の連続を考慮すると

$$B = \frac{H_{1/2} x=0}{H_0'} - \alpha \frac{h_0 + \bar{\eta}_{\infty}}{H_0'} \quad (11)$$

となって $\alpha(h_0 + \bar{\eta}_{\infty})/H_0'$ が与えられればBが求まる。

$x=0$ における平均水位の連続から、式(7)の C_0 は

$$C_0 = \left(\frac{\bar{\eta}_{x=0} + h_0}{H_0'} \right)^2 + \frac{3}{8} \beta \left(\frac{H_{1/2} x=0}{H_0} \right)^2 \quad (12)$$

となる。ここで、 $x=0$ における平均水位の上昇量 $\bar{\eta}_{x=0}$ を合田の求めた平均水位の算定図から求めることにすれば、 C_0 は求まることになる。

また、 $x=\infty$ では式(6)から

$$\frac{H_{1/2} x=\infty}{H_0} = \alpha \frac{\bar{\eta}_{\infty} + h_0}{H_0'} \quad (13)$$

となって、 $x=\infty$ での平均水位の上昇量は式(13)を式(9)に代入すると、

$$\frac{\bar{\eta}_{\infty} + h_0}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0}{1 + \frac{3}{8} \beta \alpha^2}} \quad (14)$$

となって $\bar{\eta}_{\infty}$ が求まる。しかし、 x が十分大きい時の波高を算定する α と、波高の減衰率を表す A とを見出すなければ、波高変化および水位上昇量を計算することはできない。

そこで、 α の値を見出すために、 x が十分長い地点での波高測点に対して $H_{1/2}/H_0'$ と $(h_0 + \bar{\eta})/H_0'$ をプロットした図が図-29である。この図から $H_{1/2}/H_0'$ と $(h_0 + \bar{\eta}_{\infty})/H_0'$ との平均的な関係を求めると

$$\frac{H_{1/2}}{H_0'} = 0.33 \frac{h_0 + \bar{\eta}_{\infty}}{H_0'}$$

となる。そこで $\alpha = 0.33$ として得られる。

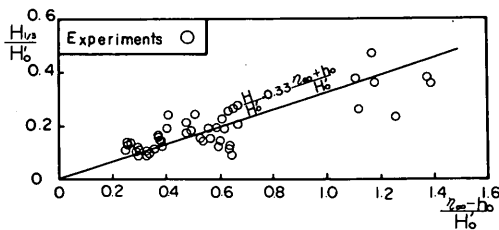


図-29 $H_{1/2}/H_0'$ と $(h_0 + \bar{\eta}_{\infty})/H_0'$ の関係

また、減衰率 A としては、 A の値を変えて種々の計算をした結果、 $A = 0.05$ を採用した。以上によって、求めるべき未知量は決まり、リーフ上の波高変化および平均水位の変化が計算できることになる。

計算例)

潮位+0.5m, 環礁なしの模型に対して1の波を用いて

計算する。この場合 $H_0' = 19.02$ cm, $T_{1/2} = 2.16$ sec, $h_0 = 2$ cmである。 $H_0'/L_0 = 0.0261$, $h_0/H_0' = 0.105$ となるから、この値を用いて $x=0$ における波高比 $H_{1/2} x=0/H_0'$ と $\bar{\eta}_{x=0}/H_0'$ を合田の算定図から求めると

$$H_{1/2} x=0/H_0' = 0.35$$

$$\bar{\eta}_{x=0}/H_0' = 0.16$$

となる。 C_0 は式(12)を用いて

$$C_0 = (0.16 + 0.105)^2 + \frac{3}{8} \times 0.56 \times 0.35^2 = 0.0959$$

となり、 $(\bar{\eta}_{\infty} + h_0)/H_0'$ は式(14)によって

$$\frac{\bar{\eta}_{\infty} + h_0}{H_0'} = \sqrt{\frac{0.0959}{1 + \frac{3}{8} \times 0.33^2 \times 0.56}} = 0.306$$

となる。これより $\bar{\eta}_{\infty}/H_0' = 0.201$ として求まる。

Bの値は式(11)から

$$B = 0.35 - 0.33 \times 0.306 = 0.249$$

として求まり、リーフ上の波高変化の式(6)は次のようになる。

$$H_{1/2}/H_0' = 0.249 \exp\left[-0.05 \frac{x}{H_0'}\right] + 0.101$$

平均水位の上昇量は式(9)から

$$\bar{\eta}/H_0' = \sqrt{0.0959 - \frac{3}{8} \times 0.56 \left(\frac{H_{1/2}}{H_0'}\right)^2} -$$

で求まる。

6.2 計算結果と実験値との比較

環礁なし模型で潮位が+0.5mおよび+2.0mについて、計算値と実験値とを比較したのが、図-30と31である。これらの図からわかるように、4の波で誤差が大きいことを除けば、計算値は実験値と比較的よくあっていると考えることができる。また、 $x/H_0' > 100$ ではほぼ一定の値に計算値はなるが、実験値は変動しており、計算値より少しずれる場合がある。このことから、 $H_{1/2}/H_0'$ の値にして0.05程度の誤差を認めるなら実用上リーフ上の波高変化の算定式として用いることができる。特に、波高の絶対値が大きい波では精度がよく、低くなると精度が悪くなる。

つきに、環礁のある場合にもこの算定式が成立つかどうかを調べるために、1の波と3の波について比較した結果が図-32と33に示してある。この図からわかるようにこの程度の環礁では環礁なしの場合と波高分布はほとんど変わらず、環礁なしの場合の算定式が十分使えることがわかる。しかし、環礁の高さがさらに大きくなった場合にもこのことが言えるかどうか疑問であり、これ以上の環礁の高さに対しては適用しないことが望ましい。

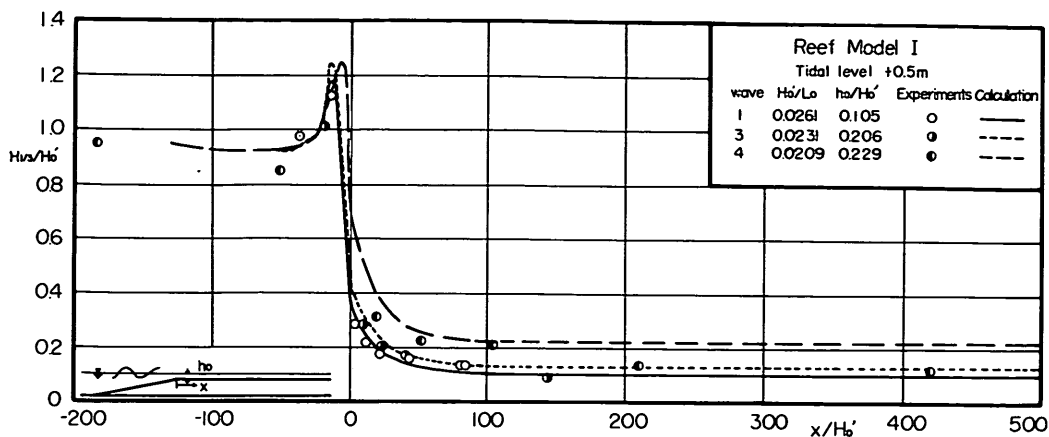


図-30 実験値と計算値の比較 (潮位+0.5 m)

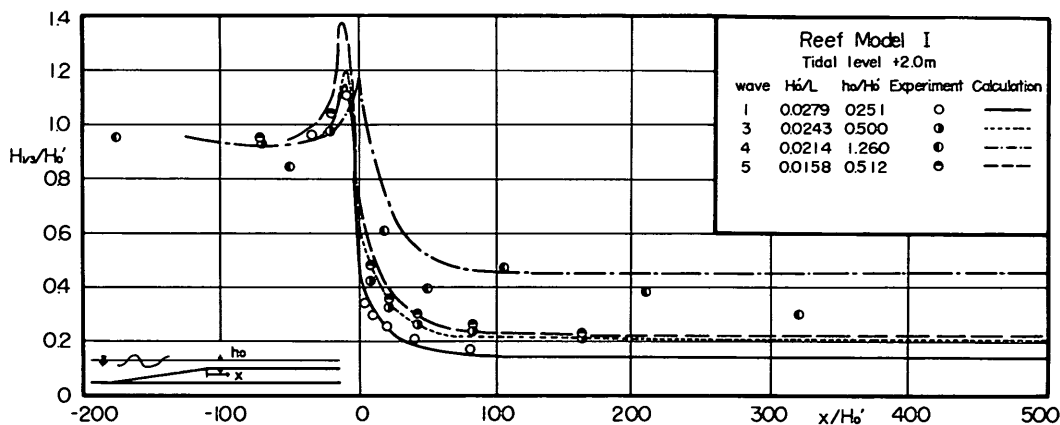


図-31 実験値と計算値の比較 (潮位 2.0 m)

一方環礁がこれよりも低い場合には十分な精度で環礁なしの算定式を用いることができると推測される。

平均水位の上昇量について、計算値と実験値と実験値を比較したのが図-34と35である。これらの図からわかるように $x/H_0' < 100$ ではかなりよい精度を計算値は示すが、 $x/H_0' > 100$ では実験値は減少傾向を示すのに対して、計算値は一定値となって両者の間には差がでてくる。しかし、実験値が減少する傾向は、模型の継目あるいは水路側壁とのすき間から過剰水圧によって水が流れ出すことによるものと考えられ、差が生じるのも当然のことかも知れない。このことを考えるなら、計算値は実用上十分使えることがわかる。つぎに、環礁がある場合について考えてみると、この場合環礁の存在によ

てリーフ先端からの水の流出が除外され、環礁なしの場合より水位が高くなる。しかし、この水位の上昇量は、本模型実験の連続環礁では、潮位+0.5 mで沖波波高の0.1程度、また潮位+0.2 mでは0.05程度環礁なしの場合より大きくなっている。そこで、実験式で計算された値にこの上昇量分だけ加えておけばよい。つぎに、不連続環礁の場合は、実験式で計算された水位上昇量に、潮位+0.5 mでは沖波の0.05、潮位+0.2 mでは沖波の0.02を加えておけばよい。

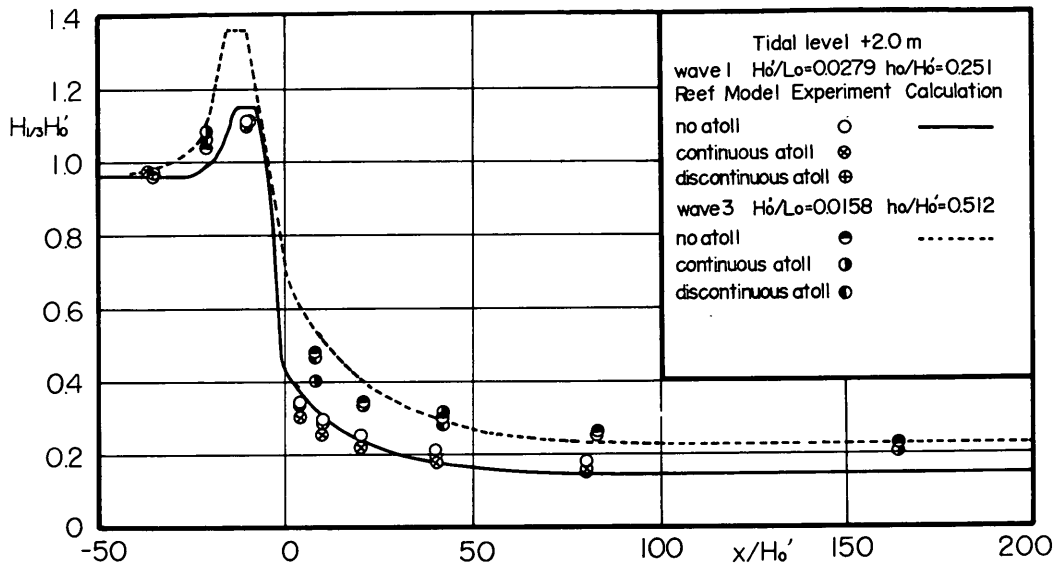


図-32 リーフ形状による波高分布の相違 (潮位+0.5 m)

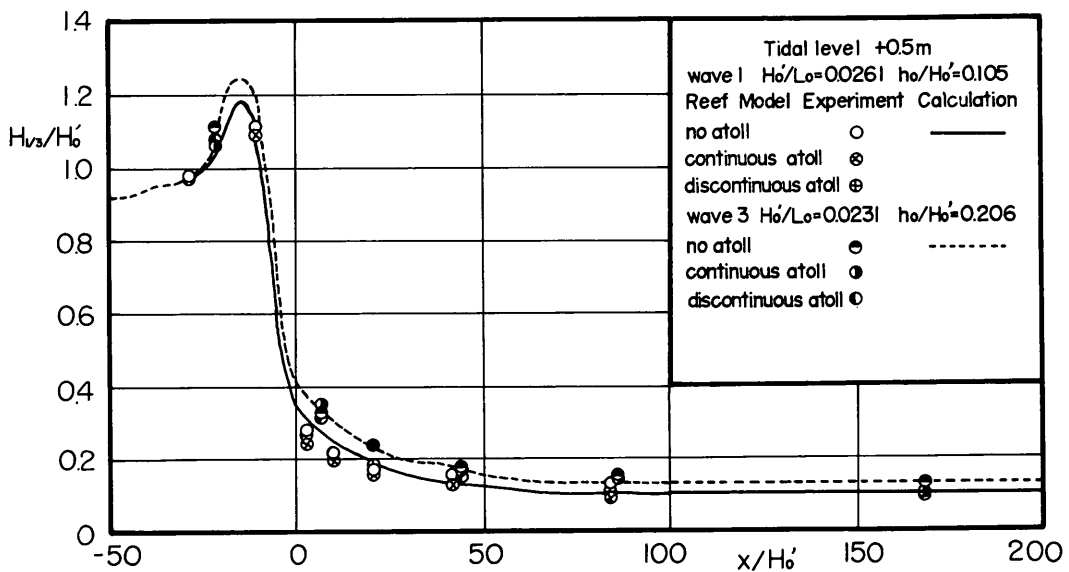


図-33 リーフ形状による波高分布の相違 (潮位+2.0 m)

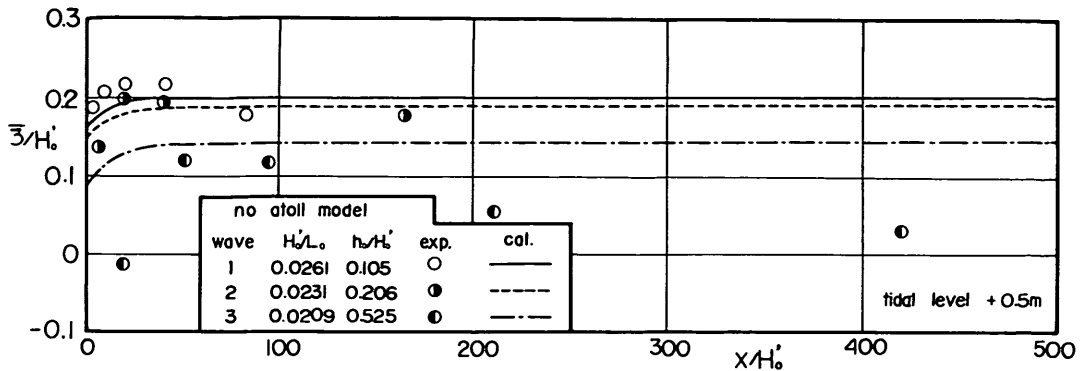


図-34 平均水位の上昇量に関する実験値と計算値との比較 (潮位 0.5 m)

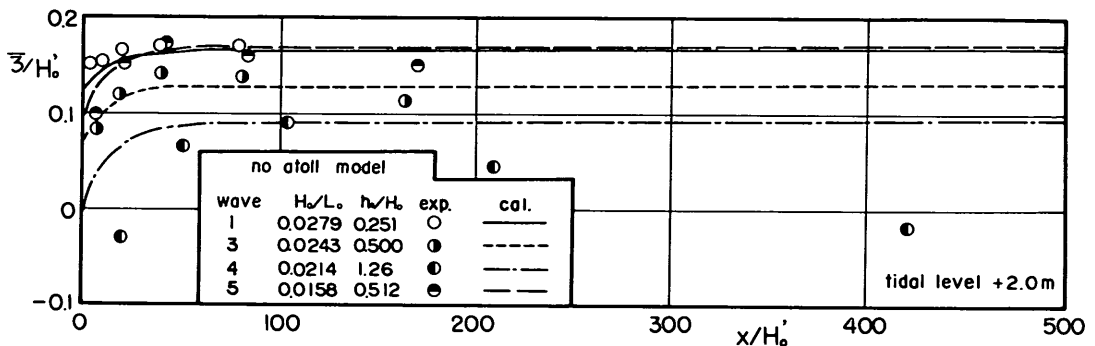


図-35 平均水位の上昇量に関する実験値と計算値との比較 (潮位 2.0 m)

7. 結 論

本論文で得られた結論は以下の通りである。

- 1) リーフ上に侵入した波のスペクトルは低周波側でエネルギーが増大し、沖波のピーク周波数付近のエネルギーは減少する。また高周波側 ($f > 2.0 \text{ Hz}$) 以上では再びエネルギーが増大する。この低周波側でのエネルギーの増大はサーフビートが発生するためであり、また高周波側での増大は砕波した波の分裂による短周期波の発生が原因となる。
- 2) 沖波で $H_{\max}/H_{1/2} = 1.5 \sim 1.6$ あった波がリーフ上を進行するにしたがって、 $H_{\max}/H_{1/2}$ は増大し、陸上部すぐ前面では $H_{\max}/H_{1/2} \geq 3.0$ にもなる場合がある。しかし最高波高は平均的にみて、その地点の有義波高の 1.8 ~ 2.0 である。
- 3) 波高はリーフ前面の斜面上で最大の波高を示し、その斜面上およびリーフ先端部で急激に減少する。さらにリーフ上を進行すると、波高の減少は次第に小さくなり、一定値に近づく傾向を示す。
- 4) 潮位または h_0/H_0' が大きくなれば、リーフ上での波高減少は小さくなる。
- 5) 同一の h_0/H_0' の値では、波形勾配が小さいほど、波高減衰は小さい。
- 6) 斜面上で上昇した水位はリーフ上でも増大し続けるかある地点で最大値を示し、以後は減少する。この減少は模型の継目あるいは側壁とのすき間から堆積した波が流出するためである。
- 7) 環礁があることによって、リーフ上に堆積した水は出てくなくなり、平均水位は環礁なしの場合より増大する。
- 8) サーフビートの強さは合田の提案した式によく一致し、海底勾配のある通常の海岸とはほとんど異なる

ことがわかった。

- 9) 波高変化および平均水位の上昇量を算定する実験式を提案した。実験式を用いて計算した結果と実験値とを比較するとかなりよい精度で一致した。これより、この計算法を用いて波高変化および平均水位の上昇量が計算できることがわかった。
- 10) 波高変化の場合には、環礁があってもなくても高さが1.5 m程度の環礁では差がなく、実験式が適用できると考えられる。しかし、平均水位の上昇量に関しては環礁があることによって大きく異なり、計算値を補正して用いる必要がある。

本研究を遂行するに当り、波浪研究室長 合田良実博士に有益な助言をいただいたことに対し、深く感謝する次第である。また、本研究は沖縄開発庁からの委託実験であることを付記するとともに、沖縄開発庁の皆様の本研究への御援助に対し深く感謝する。

参 項 文 献

- 1) Battjes, J. A. : Setup due to irregular waves, Proc. 13th Coastal Engg. Conf., Vancouver, 1972, pp. 1993~2004
- 2) 合田良実 : 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, 1975, pp. 59~106
- 3) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart : Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'Surf beats', Jour. Fluid Mech., Vol. 13, 1962, pp. 481~504
- 4) 合田良実ほか : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研資料, No. 248, 1976
- 5) Galvin, C. J. Jr ; Breaker type classification of three laboratory beaches, Jour. Geoph. Res., 73. 12, 1968, pp. 3651-3659
- 6) 室田明・岩田好一郎 : 段波の変形に関する研究, 土木学会論文集, 第160号, 1968 pp. 49~58.
- 7) Sawaragi, T. and K. Iwata : Turbulence effect on wave deformation after breaking, Coastal Engineering in Japan, Vol. 17, 1974, pp. 39~49
- 8) Zabusky, N. J. and Galvin, C. J. : Shallow water waves, the Korteweg-de Vries equation and solitons, Jour. Fluid Mech. 47. Part 4, 1971, pp. 811~824

- 9) 岩崎敏夫・真野明・小杉達郎 : 孤立性段波のソリトン分裂に関する研究, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975, pp. 47~51
- 10) Munk, W. J. : Surf beats, Trans. AGU, Vol. 30, No. 6, 1949, pp. 849-854
- 11) Tucker, M. J. : Long ocean waves : sea waves of 1 to 5 minute period, Proc. Roy. Soc., London, A. 202, 1950, pp. 565~573
- 12) 3)と同じ
- 13) 2)と同じ

記号一覧表

A	: 波高の減衰率を示す定数
C_0	: 積分定数
H_0	: 沖波波高
$H_{1/3}$: 有義波高
H_0'	: 換算沖波波高
h	: 水深
h_0	: リーフ上の水深
τ	: 波数
τ_s	: 浅水係数
L_0	: 沖波の波長
$P(\zeta)$: 正規確率分布
T_0	: 沖波の周期
x	: リーフ先端を原点として、波の進行方向を正とした水平方向の距離
α	: 定数 $\alpha = 0.33$
β	: 定数 $\beta = 0.56$
β_0	: 定数
β_1	: 定数
β_{max}	: "
θ	: リーフ斜面の勾配角
ζ	: 水面変動量
$\bar{\zeta}$: 平均水位
ζ_{rms}	: サーフビートの r.m.s
$(\zeta_{rms})_0$: 沖波の r.m.s

港湾技研資料 No. 278

1977・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社