

クレセント型潜堤およびデルタ型リーフによるサーフィン共存のための波浪制御 Wave Control for Surf-riding with Crescent-type Submerged Mound and Delta-type Reef

中野 晋*・三井 宏*・三島豊秋**

Susumu Nakano, Hiroshi Mitsui and Toyoaki Mishima

Crescent-type submerged mound and delta-type reef were combined to use as a coastal structure for enjoying surf-riding. Delta-type reef has the effect of the promotion of oblique wave breaking and rip currents. By arranging a crescent-type submerged mound in front of a delta-type reef and collecting waves to the top of the reef, breaking wave height was amplified up to twice or more. Suitable waves for beginner or average surfers were generated around the reef.
Keywords : surf-riding, crescent-type submerged mound, delta-type reef

1. はじめに

近年の余暇時間の増大に伴い、海岸構造物の設計に際しても防災機能に加えて、サーフィンなどのレクリエーション機能が考慮されるようになってきた。サーフィンに適する波浪条件として、砕波形式（巻き波型）、砕波高、斜め砕波速度（peel velocity）、定常な離岸流の存在などが重要な要素である。著者らは徳島県南部の海部川河口の深浅測量や模型実験を通し、サーフィン共存型海岸構造物としてデルタ型リーフの有用性に関して検討を続けてきた^{1)~3)}。これによれば、デルタ型リーフは巻き波や斜め砕波、離岸流の固定などサーフィンに必要な波を発生させ、しかも、背後の打ち上げ高の軽減効果など防災面でも効果を有する。しかし、肝心の波高の増幅効果の点では不十分であることが指摘されている。

これまでに集波を目的とした波浪制御構造物がいくつか提案されている。波の反射を用いた方法ではベッセルホーン型反射堤⁴⁾やV字型集波堤⁵⁾などがあり、波の位相のずれを利用した屈折型の方法ではフレネルレンズ型潜堤⁶⁾、没水平板⁷⁾などがある。集波堤の場合、2~3倍までの波高増幅は期待できるが、堤からの反射エネルギーが大きく、反射堤周辺での流れが複雑になることからサーフィンには危険性が高いと考えられる。また水面から突出した構造となるため、景観上あまり好ましくない。一方の屈折型で没水構造の潜堤や水平板は反射波が小さいこと、景観上有利であることなどの長所を有している。没水平板は集波効果が高いことに加え、潜堤型に比べると現地での設置が格段に容易である。しかし、海底と平板の間にサーファーが巻き込まれる危険性があり、安全性の点で心配である。そこで、本研究では潜堤型の集波装置と斜め砕波の促進装置であるデルタ型リーフを組み合わせた波浪制御工法について検討している。潜堤型にはフレネルレンズ型、クレセント型などが考えられるが、潜堤からの反射波が少ないクレセント型の潜堤をデルタ型リーフの前面に設け、波をリーフ頂部に収れんさせた後、デルタ型リーフ上で斜め砕波を発生させる実験を行った。

2. 実験模型と実験方法

(1) 模型

a. デルタ型リーフ

実験水槽および両方の模型を設置した状況を図-1に、デルタ型リーフの実験模型の形状を図-2に示す。図-2に示すデルタ型リーフはサーフポイントで見られる河口テラス形状を模擬したもので、初・中級者のサーファー向けの波が発生しやすいよう

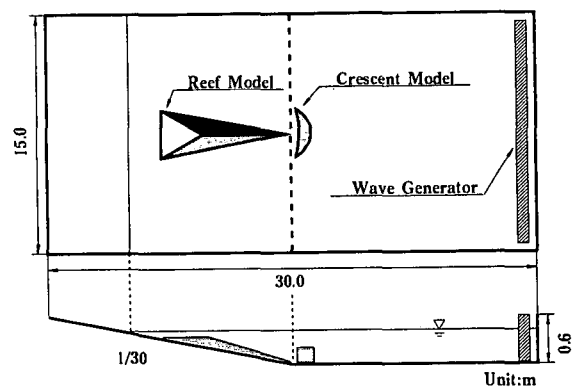


図-1 実験水槽および模型の設置状況

* 正会員 徳島大学工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島町2-1)

** 正会員 (株)ニュージェック 水工部

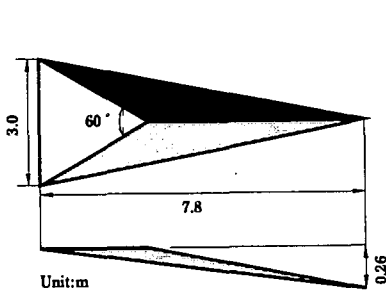


図-2 デルタ型リーフ
模型形状

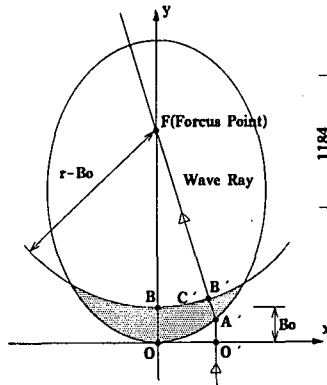


図-3 クレセント型潜堤の設計

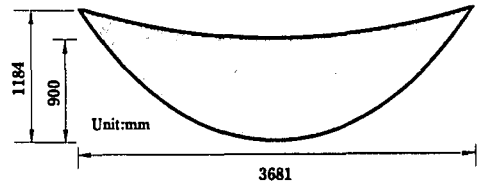


図-4 クレセント型
潜堤模型形状

表-1 実験条件

Case	実験模型	海底 勾配	入射波条件	
			T(s)	H ₀ /L ₀
1	クレセント型潜堤	1/30	1.1	0.009
2				0.015
3				0.030
4				0.030
5	デルタ型リーフ	1/30	1.1	0.009
6				0.015
7				0.030
8	クレセント型潜堤 + デルタ型リーフ	1/30	1.1	0.009
9				0.015
10				0.030

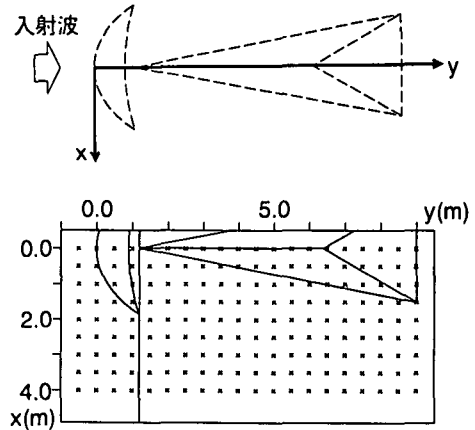


図-5 座標系と波高測定位置

に頂角は60° になっている。なお、この模型は3)の文献で使用したものと同一である。水平部の水深は31cm、リーフの天端上水深は5cmである。

b. クレセント型潜堤

クレセント型潜堤の諸元は今井ら⁷⁾ 没水平板の研究を参考に次の条件を満たすように設計された。つまり、図-3のように点Fに波を集める場合、①潜堤から出るとききの反射を小さくするため、潜堤の岸側外縁が波向き線に垂直に交わること、②波が同位相で点Fに到達するために、潜堤を出てから焦点までの到達時間が等しいこと、同様に、③基準線(x=0)から点Fまでの到達時間が等しいこと、の3条件を満たすことである。

この結果、岸側と沖側の外縁は次の円および楕円の式で表される。

$$x^2 + (y-r)^2 = (r-B_0)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{x^2}{\{r\sqrt{(1-n)/(1+n)}\}^2} + \frac{\{y-r/(1+n)\}^2}{\{r/(1+n)\}^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、n は屈折率 (=C/C₀)、C は潜堤上での波速、C₀ は潜堤外での波速、r は焦点距離、B₀ は潜堤基準幅である。

この実験では潜堤の天端上水深を15cmとしたため、屈折率n は0.76となる。潜堤を水平部に設置し、デルタリーフの中央付近で集波するように焦点距離 r=7.0mとした。また潜堤基準幅 B₀ は製作上の容易さを考慮して0.9mとした。クレセント潜堤の模型形状を図-4に示す。

(2) 実験条件

現地の海岸で快適にサーフィンを楽しむためには少なくとも50~100mの斜め砕波帯が必要である。そのためには現地に施工するデルタ型リーフは1辺100m前後となる。したがって実験スケールを1/30として波浪条件を設定した。実験波の周期は1.1s(現地6.0s)、深海波形勾配 H₀/L₀ は3種類(0.009, 0.015, 0.03)である。実験はクレセント型潜堤とデルタ型リーフを比較するため、①クレセント型潜堤のみ ②デルタ型リーフのみ ③

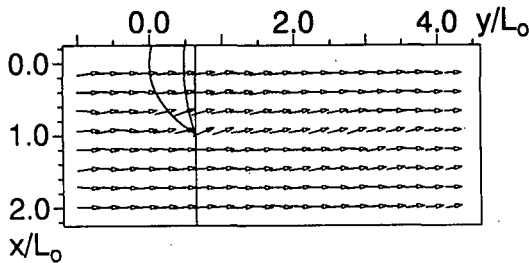


図-6 クレセント型潜堤周辺の波向き変化 (Case 1)

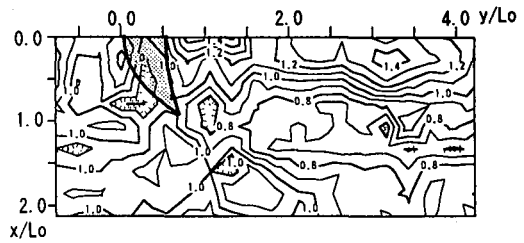


図-7 潜堤周辺の波高増幅率分布 (Case 1)

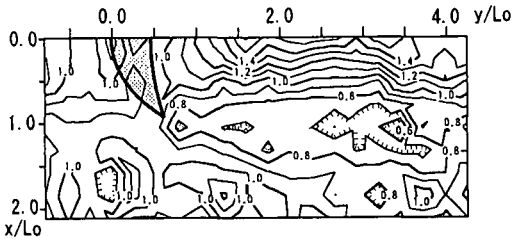


図-8 潜堤周辺の波高増幅率分布 (Case 2)

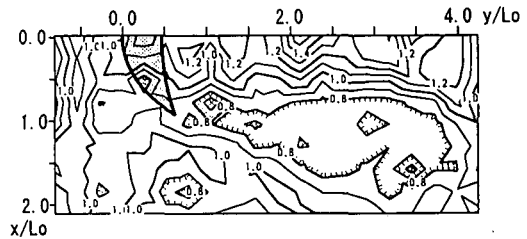


図-9 潜堤周辺の波高増幅率分布 (Case 3)

クレセント型潜堤+デルタ型リーフの3ケースについて行った。なお、①クレセント型潜堤のみの実験では潜堤背後の斜面の影響を調べるため、潜堤を沖側に設置して水平床部で集波させる実験も行っている。測定項目は波高と波向き変化、碎波状況である。測定ケースと波浪条件をまとめて表-1に示す。

(3) 実験方法

波高は50cm間隔で架台に取り付けた5台の容量式波高計を順次移動しながら測定した、測定点総数は50cmメッシュに計180点である。波高測定位置と解析上の座標を図-5に示す。x軸の原点は模型の中心軸の位置で、y軸の原点は潜堤の基準線(沖側端)とする。またpeel velocity(斜め碎波速度)は水槽に隣接した校舎の屋上から8mmビデオカメラで撮影し、後で解析した。

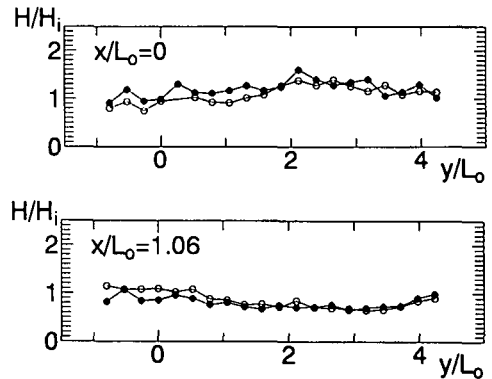


図-10 潜堤周辺の波高変化に及ぼす海底勾配の影響

3. 実験結果と考察

(1) クレセント型潜堤の集波特性

a. 波向き変化

x軸上の隣り合う波高計の同時記録をもとにクロススペクトル法から2点間の位相差を求め、回折、屈折を含んだ平均的な波峰線とx軸とのなす角(屈折角)を求めた。図-6に $H_0'/L_0 = 0.009$ のケースの潜堤周辺の波向き変化を示す。波が潜堤上を通過することにより屈折し、潜堤の背後で波が収れんする状況が見られる。図-3からもわかるように屈折角は潜堤の先端部ほど大きく、模型設計上は最大 17.6° である。しかし、 $H_0'/L_0 = 0.009, 0.015, 0.030$ に対し、最大屈折角はそれぞれ $22.5^\circ, 21.0^\circ, 19.9^\circ$ といずれも設計値より大きくなっている。これは先端部での回折現象が無視できないことや潜堤上での水深変化に伴って短周期成分波が発達した影響と考えられる。

b. 波高増幅率

図-7~9に潜堤周辺での波高増幅率 H/H_0 (H_0 : 水平床部での入射波高)の平面分布を示す。水平床上での設計では $y/L_0=3.7$ 付近で収れんするが、いずれのケースもこれより沖側で波高は最大となっている。これは今井らの没水平板の場合と同様であり、倍周波成分波の発達や回折散乱波の影響と考えられる。また最大増幅率は波形勾配の小さい順に、1.53, 1.69, 1.66と最大で6割程度の増幅効果を示す。図-10では潜堤の中心軸上($x/L_0=0$)と潜堤脇($x/L_0=1.06$)の波高変化を斜面と水平床とで比較したが、さほど大きな違いは見られなかった。

(2) クレセント型潜堤を備えたデルタ型リーフの集波特性

ここではデルタ型リーフのみの場合とクレセント型潜堤とデルタ型リーフの両方を備えた場合の結果を比較しながら述べることにする。

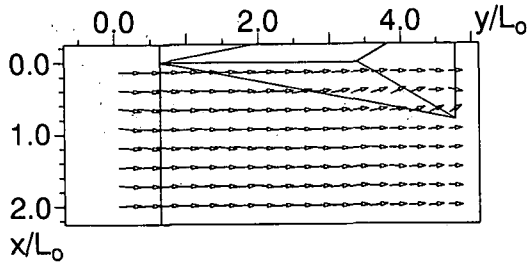


図-11 デルタ型リーフ周辺の波向き変化
(Case 6)

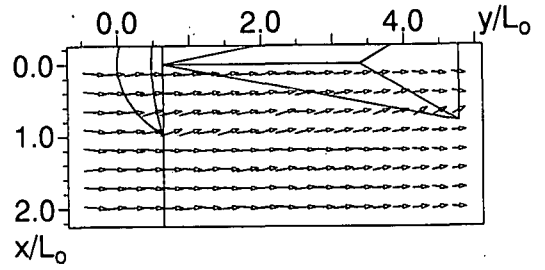
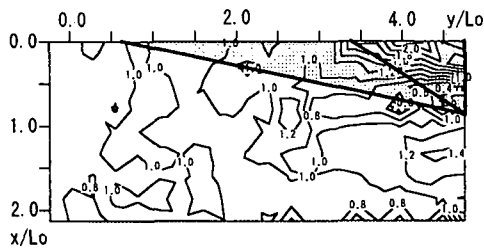
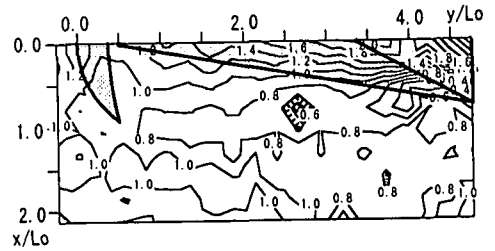


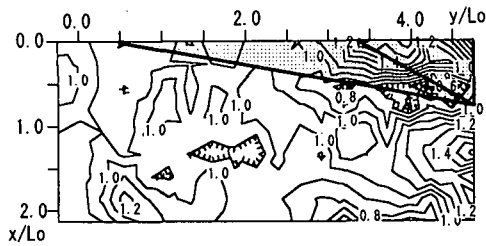
図-12 クレセント型潜堤+デルタ型リーフ
周辺の波向き変化 (Case 9)



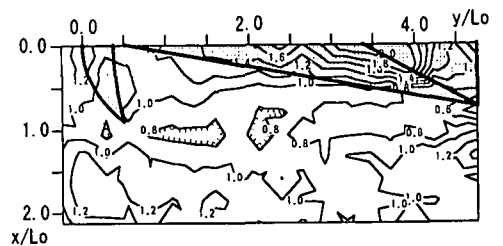
(Case 5, $H_0'/L_0=0.009$)



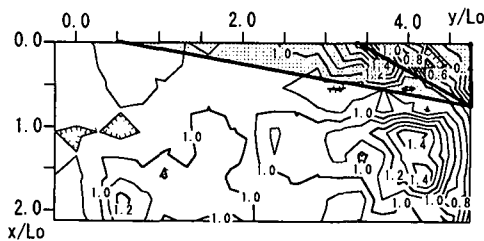
(Case 8, $H_0'/L_0=0.009$)



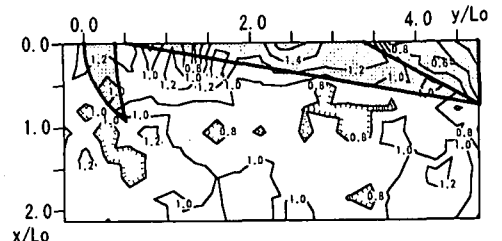
(Case 6, $H_0'/L_0=0.015$)



(Case 9, $H_0'/L_0=0.015$)



(Case 7, $H_0'/L_0=0.030$)



(Case 10, $H_0'/L_0=0.030$)

図-13 デルタ型リーフのみの波高分布

図-14 クレセント型潜堤+デルタ型リーフの
場合の波高分布

a. 波向き変化

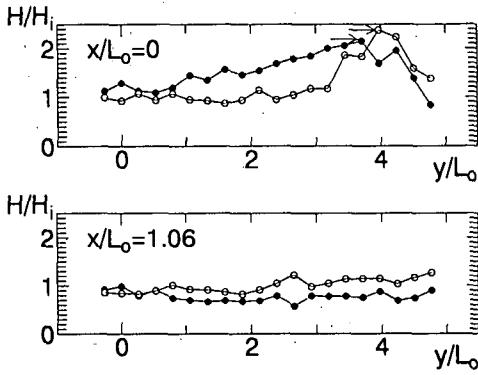
図-11および12にリーフ周辺の波向き変化を示す。デルタ型リーフの天端付近では潜堤+リーフ(Case 9)の屈折角がリーフのみ(Case 6)に比べて大きいことがわかる。これは潜堤により屈折した波がリーフ斜面でさらに屈折するためである。なお、図には示していないが、波形勾配が大きいほど屈折角が小さくなる傾向が両方の模型で確認された。

b. 波高増幅率

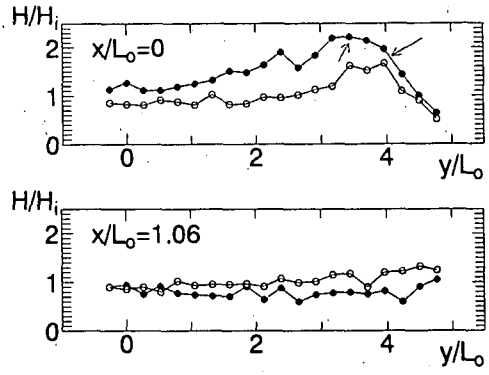
図-13にデルタ型リーフのみについて、図-14はクレセント型潜堤も備えたリーフについて波高増幅率の空間分布を調べたものである。リーフのみの場合、リーフ天端から側面にかけての狭い範囲で波高増大が見られる。また波形勾配が大きくなると碎波点が沖側に移動し、最大波高増幅率は小さくなっている。天端付近の集波領域に加え、 $x/L_0=1.3\sim 1.6$ 、 $y/L_0=4.0\sim 4.5$ 付近でも波高の大きな部分があるが、斜め碎波と戻り流れ(離岸流)

○ - デルタ型リーフのみ

● - クレセント型潜堤+デルタ型リーフ

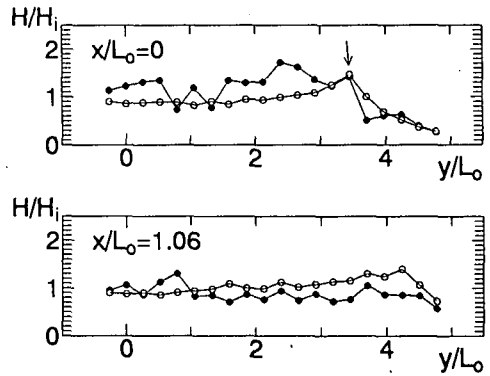


($H_0'/L_0=0.009$)



($H_0'/L_0=0.015$)

の相互干渉によるものと考えられる。一方、潜堤+リーフの場合にはリーフのみの場合と同様、リーフの中心軸付近に波の集中が見られるが、 $x/L_0=2$ より、岸側の広い範囲で集波領域が広がっている。そのため、リーフの脇では広い範囲で波高の減少が見られる。図-15にはリーフの中心軸上 ($x/L_0=0$) とリーフの脇 ($x/L_0=1.06$) での波高変化を波形勾配ごとに示している。中心軸上では、リーフのみの場合、リーフ天端付近で急激に波高が増大するのに比べ、潜堤+リーフでは潜堤通過直後から広い範囲で波高が大きくなっていることが良くわかる。広い範囲での波高増幅は一カ所で多くのサーファーを吸収できる点で特に重要な要素である。一方、リーフ脇では潜堤+リーフの方が集波効果が高い分、波浪エネルギーが減少していることがわかる。



($H_0'/L_0=0.030$)

図-15 岸方向への波高変化の比較

なお、クレセント型潜堤は $y/L_0=0\sim 0.63$ に設置されている。デルタ型リーフは斜面の先端から天端先端までが $y/L_0=0.64\sim 3.40$ 、天端は $y/L_0=3.40\sim 4.78$ に位置する。また、図中に示した矢印は碎波位置を示している。各実験ケースの最大波高増幅率 H_{max}/H_i を模型別に比較したのが図-16である。これからはデルタ型リーフも波高増幅の点からは波形勾配の小さいケースでは有効であることがわかる。しかし、 $H_0'/L_0=0.015$ の場合には増幅率は小さくなっており、潜堤とリーフを組み合わせることによって広い範囲の波浪条件でサーフィンが可能になると考えられる。

(3) 倍周波数成分波の発達特性

図-17は構造物周辺の波の分散状況を知るために、中心軸上での n 倍周波数成分波の振幅 A_n ($n=1, 2, 3$) を入射波の振幅 A_i ($=\sqrt{A_{i1}^2+A_{i2}^2+A_{i3}^2}$, A_{in} は入射波の n 倍周波数成分波振幅) で無次元化したものの変化を調べたものである。リーフのみの場合は $y/L_0=3.40$ のリーフ天端先端に近づいて急に2倍、3倍周波数成分波の増大が見られるとともに碎波後には倍周波成分波がエネルギーの大部分を占めるようになる。一方、潜堤+リーフの場合には潜堤通過後に2倍周波数成分波が発達しており、その傾向も波形勾配の大きいほど顕著である。

(4) デルタ型リーフ上での碎波とサーフィン適性

サーフィンに適する波としての三要素は碎波高、碎波形式、peel velocity (斜め碎波の進行速度) である。このうち、碎波高と peel velocity がサーフィンの難易度と関係している。

図-18はクレセント型潜堤を備えたデルタ型リーフ上の碎波高とビデオ撮影による求めた peel velocity の関係を見たものである。ここで、図中の●印はCase 8、▲はCase 9、■はCase 10を示す。Walker et al.⁶² は碎波角、peel velocity v_s 、碎波高とサーフィンの難易度に関する図を作成している。本実験のように碎波点での屈

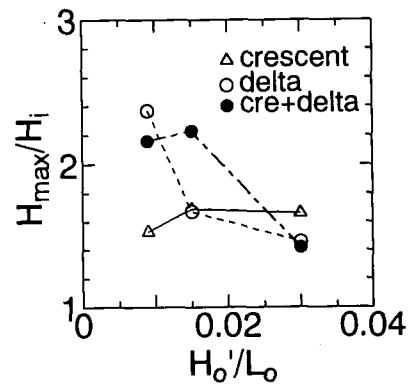


図-16 最大波高増幅率の比較

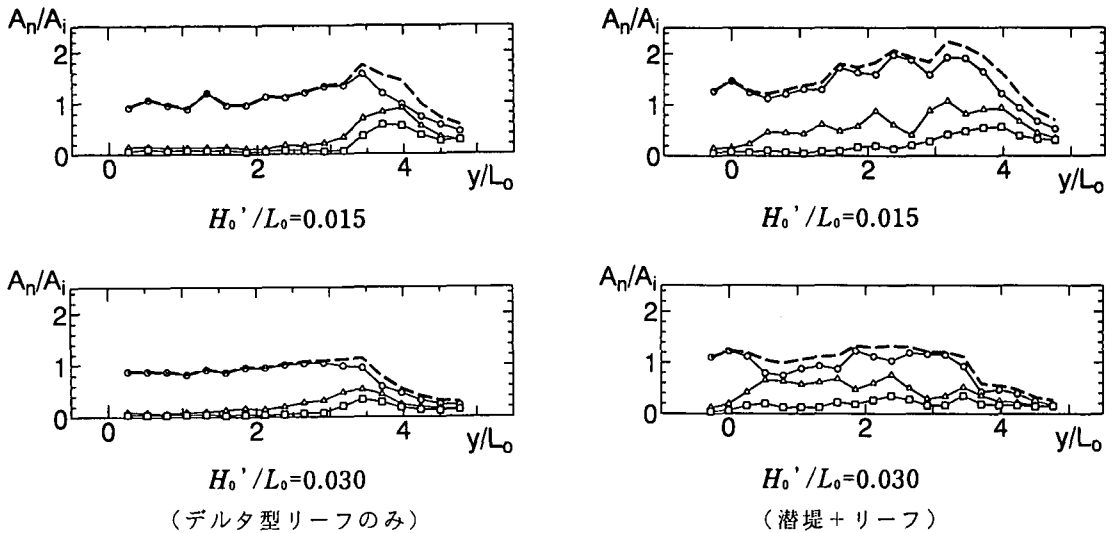


図-17 倍周波数成分波の発達 (○-基本周波数, △-2倍周波数, □-3倍周波数)

折角が 60° 前後の場合には概ね図中に示したような碎波条件でサーフィン能力ごとの分類がなされる³⁾。これによると波形勾配の小さいうねり性の波浪の場合には初・中級レベルのサーフィンに最適な碎波が得られることがわかる。

4. おわりに

サーフィン共存型海岸構造物の条件として、静穏時の碎波高を確実に増大させることが重要である。本研究は集波効果のあるクレセント型潜堤をリーフ前面に配置することにより、広い波浪条件でサーフィンが可能となる構造物を模索したものである。この結果、図-18に見られるように波形勾配が0.015以下のうねり性波浪の場合にはサーフィンに適する波が発生することが確認された。実際に施工の上では打ち上げ高の軽減効果や漂砂への影響、離岸流の発生など明らかにするべき事項は多々残されている。特にこの構造物は複数配置することにより、漂砂制御などの役割を果たすことも可能であると考えられる。

最後に、卒論生として実験、解析に携わって頂いた田村裕作君および中田敦史君に深く感謝いたします。

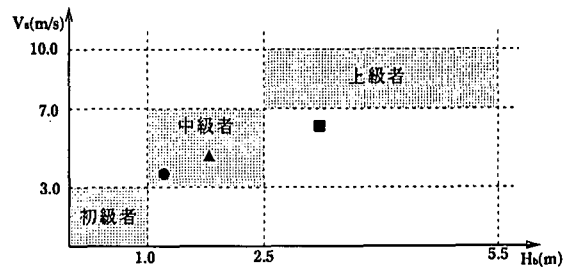


図-18 碎波特性とサーフィン適性

参考文献

- 1) 吉田善昭・中野 晋・増味康彰・三井 宏 (1991) : サーフィンに適する波と人工リーフの関係, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 113-118.
- 2) 中野 晋・吉田善昭・三井 宏 (1993) : サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の流れと漂砂, 海洋開発論文集, Vol. 9,
- 3) 中野 晋・三島豊秋・中野孝二・三井 宏 (1994) : サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の波浪特性, 海岸工学論文集, Vol. 41, pp. 721-725.
- 4) 金谷安洋・川村正司・中野 晋・三井 宏 (1990) : ベッセル・ホーン型反射堤の集波効果, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 131-136.
- 5) 小松英則・中野 晋・三井 宏 (1989) : 集波用V字型堤の集波特性, 海洋開発論文集, Vol. 5, pp. 257-261.
- 6) Stannes J. J. et al. (1983) : Nonlinear focusing of surface waves by a linear theory and experiment. J. Fluid Mech, Vol. 135, pp. 71-94.
- 7) 今井貫爾・秋山義信・池谷 毅・工藤君明・続辰之介 (1989) : クレセント型没水水平板の集波効果に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- 8) Walker J. R., R. Q. Palmer and J. K. Kukea (1972) : Recreational surfing on Hawaiian reefs, Proc. of 14th Coastal Engineering, ASCE, pp. 2609-2628.