

# サーフィン共存型潜堤およびリーフ周辺の波浪特性 Wave Properties around Delta-Type Reef and Crescent-Type Submerged Mound for Enjoying Surf-riding

中野 晋\*・高田康史\*\*・三島豊秋\*\*\*・三井 宏\*  
Susumu Nakano, Yasufumi Takata, Toyoaki Mishima and Hiroshi Mitsui

We have been proposed the delta-type reef as the coastal structure to generate good waves for surf-riding. It is effective for a promotion of oblique wave breaking and an amplification of waves. Waves can be concentrated and amplified by setting up the crescent-type submerged mound in the front of the delta-type reef. In this research, the transformations of waves around these structures were calculated by the MSE numerical simulation. The properties of these structures were examined from the calculated results.

Keywords : surf-riding, delta-type reef, crescent-type submerged mound, MSE numerical simulation

## 1. はじめに

長い間マイナーなスポーツと考えられていたサーフィンであるが、サーフィン人口の着実な増加や地域の活性化対策としての認知により、サーフィンの社会的地位が確立しつつある。その反面、これまでに建設されてきた様々な海岸構造物により、貴重なサーフスポットが消滅した事例も多く、防災面や水産資源の面に加えて、レジャー施設としての面から海岸地形や構造物を考える時期に来ている。本研究は海岸レジャーの代表としてサーフィンに焦点をあて、防災機能や景観面に優れ、かつサーフィンとも共存できる海岸構造物の開発を希求したものである。著者ら<sup>1)~3)</sup>はこうした観点から数年前から研究をはじめ、サーフィンスポット形式の1つである河口テラス型リーフ（デルタ型リーフ）を考案し、リーフ上での砕波特性、防災機能（消波、打ち上げ高軽減など）、またクレセント型潜堤との複合型構造物とすることによるサーフィン共存性効果を検討してきた<sup>4)</sup>。その結果、この構造物は防災機能とともにサーフィンに必要な斜め砕波促進機能に優れており、さらにクレセント型潜堤との複合型構造物とすることにより、波高増幅率の増加、増幅範囲の拡がりの点で良好な結果が得られることがわかった。そこで今回、著者らが過去に行ったデルタ型リーフとクレセント型潜堤との複合型構造物における実験結果と双曲型緩勾配方程式による数値計算結果とを比較することにより、潜堤およびリーフ周辺における緩勾配方程式の適用性を検討した。またデルタ型リーフの形状が波浪変形特性におよぼす効果を数値計算より検討した。

## 2. 数値計算と実験の比較

### 2. 1 計算手法の概要

#### (1) 緩勾配方程式に基づく波浪変形計算

デルタ型リーフおよびクレセント型潜堤周辺の波浪変形を山下<sup>5)</sup>が用いた双曲型緩勾配方程式の計算方法を用いた。基礎式はBerkoff<sup>6)</sup>の提案した緩勾配方程式と等価な次式である。

$$\frac{\partial P^*}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\left( \frac{iW}{\omega} + \frac{C_g}{C} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P^*}{\partial x} + \frac{\partial Q^*}{\partial y} + W\zeta = 0 \quad (3)$$

\* 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)

\*\* 学生会員 徳島大学大学院

\*\*\* 正会員 (株) ニュージェック 水工部

ここに、 $C$ は波速、 $C_g$ は群速度、 $k$ は波数、 $P^*$ 、 $Q^*$ は複素線流量、 $\zeta$ は複素水位変動、 $\omega$ は角周波数である。また、式(3)の $W$ は波のエネルギー逸散率 $D$ と波のエネルギー $E$ の比で表される。浅海域では波と流れ共存場としての考慮が必要であるが、ここでは流れの効果は無視している。計算はADI法を用い、造波境界と岸側境界にスポンジレイヤーを設けた。砕波限界には式(4)、砕波によるエネルギー散逸率 $D$ はDally et al.<sup>7)</sup>が提案している式(5)を用いた。

$$H_b/h=0.8 \tag{4}$$

$$D=\frac{K}{h}(EC_g-E_sC_{gs}) \tag{5}$$

ここで、 $K$ は減衰係数で0.2、 $E_sC_{gs}$ は砕波減衰後の波のエネルギーフラックスである。

(2) 計算条件

図-1、図-2にデルタ型リーフおよびクレセント型潜堤の形状を示す。縮尺1/30の模型を用いて実施した平面波浪実験の実験条件を表-1に示す。デルタ型リーフの天端水深は5cm、クレセント型潜堤の天端水深は15cmである。なお、詳細は中野ら<sup>4)</sup>に示されている。

デルタ型リーフの形状はリーフ斜面のり面勾配 $\tan \beta'$  (実験模型は1/10)、リーフの頂角 $\theta$  (実験模型は $60^\circ$ )、リーフ天端底辺長 $B$  (模型は3m)などが挙げられる。計算では上記の他、リーフの頂部幅 $b$  (実験は0m)も変化させて、形状変化の影響について考察した。形状変化の種類を図-3a、3b、3cに、計算条件をまとめたものを表-2に示す。なお、すべてのケースにおいて計算の $\Delta x$ 、 $\Delta y$ は3m (模型では0.1m)とした。

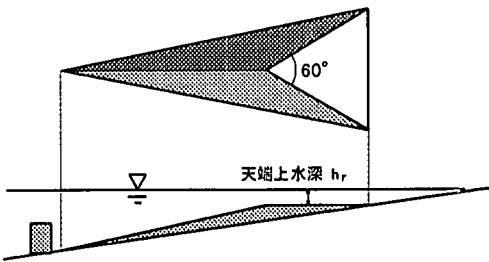


図-1 デルタ型リーフ形状

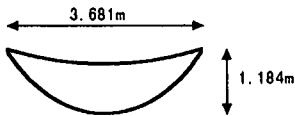


図-2 クレセント型潜堤形状

表-1 実験結果との比較のための計算条件

| ケース番号 | 実験模型          | 海底勾配 | 入射波条件 |           |
|-------|---------------|------|-------|-----------|
|       |               |      | T(s)  | $H_0/L_0$ |
| 1     | デルタ型リーフ       | 1/30 | 1.1   | 0.009     |
| 2     |               |      |       | 0.015     |
| 3     |               |      |       | 0.030     |
| 4     | クレセント型潜堤<br>+ | 1/30 | 1.1   | 0.009     |
| 5     |               |      |       | 0.015     |
| 6     |               |      |       | 0.030     |

表-2 形状変化の計算条件

|        |                |                                   |
|--------|----------------|-----------------------------------|
| 形状変化   | $b/L_0$        | 0.0, 0.176, 0.353, 0.530          |
|        | $\tan \beta'$  | 1/8, 1/10, 1/12                   |
|        | $\theta$ (deg) | 55, 60, 70                        |
| 天端上水深  | $h_r/L_0$      | 0.0106, 0.0265, 0.0424            |
| 深海波形勾配 | $H_0/L_0$      | 0.007, 0.009, 0.011, 0.013, 0.015 |

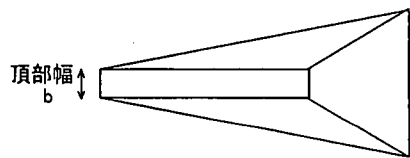


図-3a 頂部幅変化

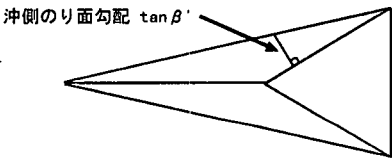


図-3b 沖側のり面勾配変化

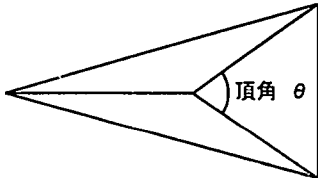


図-3c 頂角変化

2. 2 実験結果との比較

(1)波高増幅率

波高増幅率の平面分布を図-4a、4b、4c、4dに示す(上部が計算値、下部が実験値)。これらによると、最大波高が現れる位置は計算値の方が沖側に若干ずれている。また、この傾向は波形勾配が大きくなるほど、強くなることがわかる。図-5に最大波高について両者の比較を行っているが、いずれのケースでも計算値が実測値に比べ大きくなっている。これらのことから、今回の計算ではリーフ上での波高増幅が大きめに評価されていることがわかる。この原因は主としてリーフ上での岸向きの波浪流が波浪変形計算に考慮できていないためではないかと考えている。しかし、図-4a～dに示しているようにリーフ周辺の波浪変形の特性は概ね表現できてお

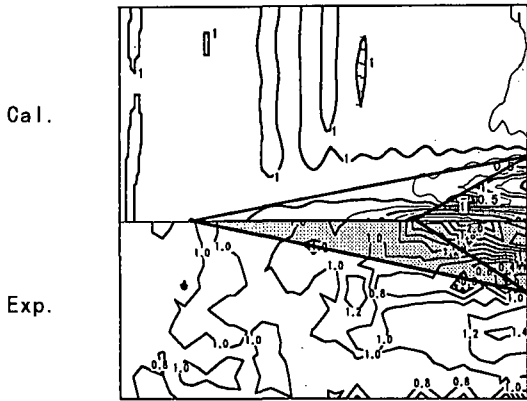


図-4a 波高増幅率の平面分布(ケース 1)

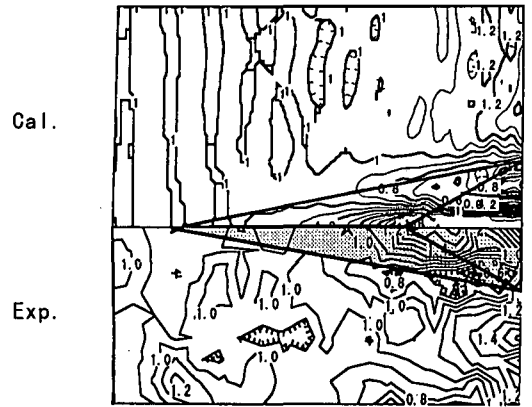


図-4b 波高増幅率の平面分布(ケース 2)

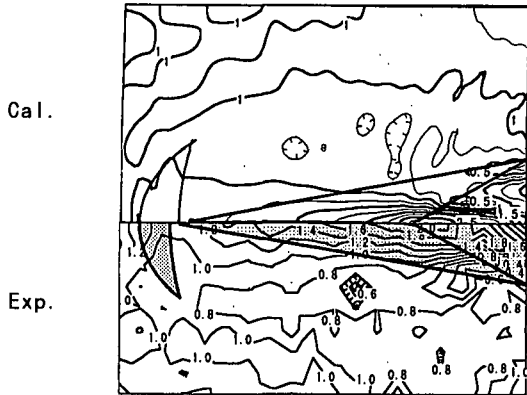


図-4c 波高増幅率の平面分布(ケース 4)

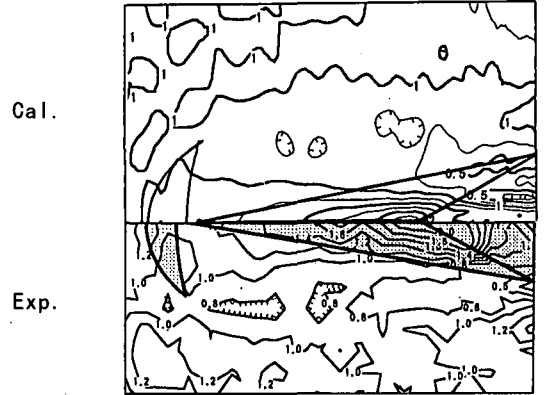


図-4d 波高増幅率の平面分布(ケース 5)

り、この計算を用いて各種リーフ形状とサーフィン波の関係について検討できると判断した。

### 3. リーフ形状と砕波特性

波浪条件、リーフ形状を変化させて、デルタ型リーフについて 120 ケース、デルタ型+クレセント型潜堤について 90 ケースの計算を行った。以下ではサーフィンの波として重要な砕波波高および斜め砕波速度について考察する。

#### 3.1 砕波波高

##### (1) デルタ型リーフ

計算により求めた  $H_0'/L_0$  と  $H_B/H_0'$  ( $H_B$ : 砕波波高) の関係を図-6a, 6b, 6c に示す(計算条件は表-2 に基づく)。砕波点は  $H_0'/h = 0.8$  の砕波条件を満たす最も沖合の位置として、その位置での波高を用いた。

図中に示した曲線は砂村<sup>8)</sup>や Le méhauté & Koh<sup>9)</sup> が提案している  $H_0'/L_0$  と  $H_B/H_0'$  に関する経験式を示している。なお、これらの式は海底勾配  $\tan \beta$  により変化するので、これを計算と実験に対応する 1/30 とした場合の結果である。

図-6a によると、頂部幅を拡げるにつれ、波高増幅率が多少減少しているものの、その減少は微小であり、全体的に見て、リーフの頂部幅変化の影響は波高増幅に関与しにくいといえる。頂部幅はリーフの利用可能者との関係が深くため、広い方が望ましい。しかし、今回計算を行ったケース以上の大幅な頂部幅の拡大を行うと、波の収れんが不十分になること

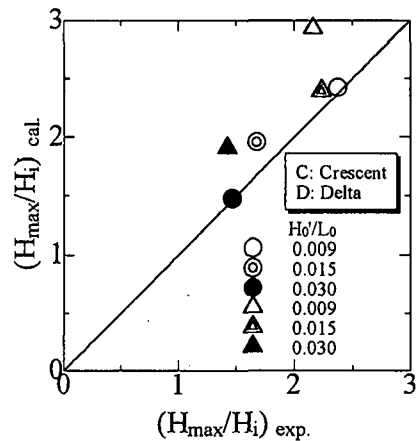


図-5 最大波高増幅率の比較

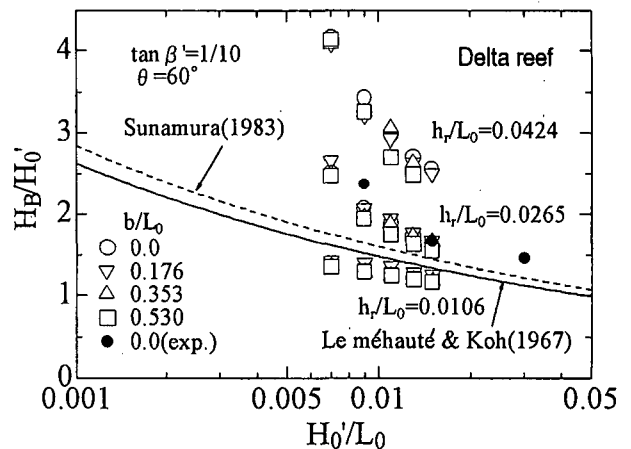


図-6a 砕波波高(頂部幅の影響)

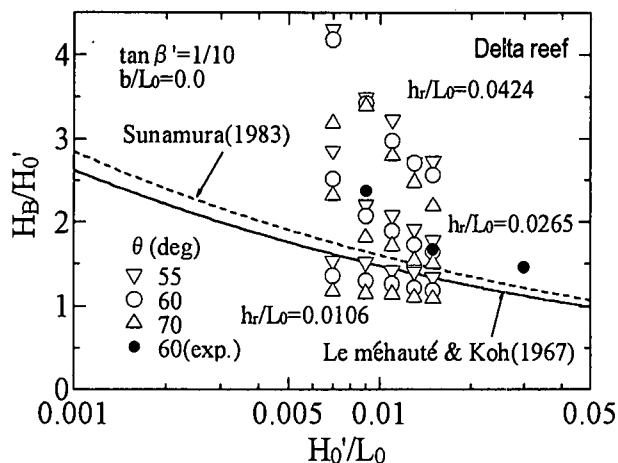


図-6b 碎波波高（頂角の影響）

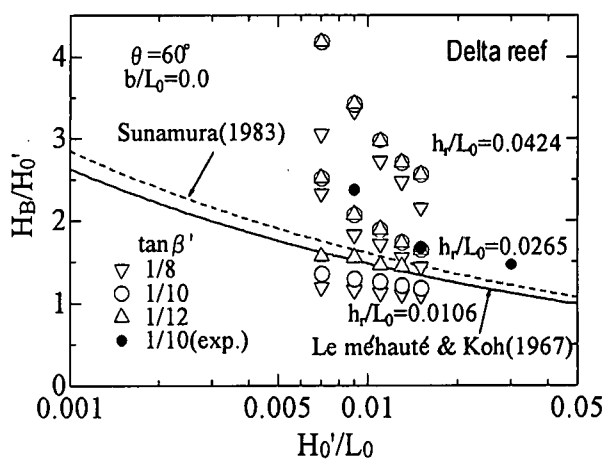


図-6c 碎波波高（リーフ斜面のり面勾配の影響）

や、良好な斜め碎波が発生しないことが予想され、頂部幅は今回の範囲 ( $b/L_0 = 0.0 \sim 0.530$ ) 前後が適当であると思われる。頂部幅よりもむしろ、天端上水深が碎波波高に及ぼす影響の方が遙かに大きく、天端上水深はサーフィン共存型リーフを設計する上で最も重要な要因の一つであるといえる。また、波浪災害が問題となる  $H_0'/L_0$  が大きい場合には、波高増幅率は  $1/30$  勾配斜面の値に近づいており、高波浪時には波高増幅機能に比べて碎波による波高減衰機能が発揮されると期待される。図-6b によると、沖側のり面勾配が緩やかになるにつれ、碎波波高は大きくなっている。これは、のり面勾配を小さくするとリーフの延長が長くなるため、波の屈折効果が高まったものと考えられる。また、沖側のり面勾配は、碎波波高の増減の他に碎波形式にも重要な影響を及ぼす。つまり、一般に知られているようにのり面勾配が急になる程、巻き波型碎波に近づき、緩やかな程、崩れ波型碎波が生じやすくなる。なお  $\tan \beta' = 1/10$  の条件での実験では波形勾配が  $0.009 \sim 0.03$  で巻き波型碎波が発生することが確認されている。サーフィンに最適な碎波形式が巻き波型碎波であることを考慮に入れると、リーフののり面勾配には  $1/10$  程度が適当であると思われる。また、天端上水深の影響が大きいことは、上述した図-6a と同様である。

図-6c によると、リーフの頂角が小さくなるにつれ、碎波波高が大きくなっている。これは沖側のり面勾配を変化させたケースと同様に頂角を小さくするほど、リーフの延長が長くなり、波が十分に屈折したからであると考えられる。リーフの頂角は碎波角、peel angle などの関係が深く、サーフィン機能を考慮する上では重要な要素である。しかし、今回計算を行った範囲 ( $55^\circ \sim 70^\circ$ ) では、碎波角の変化は小さく、碎波角に限りていえば、リーフの頂角の影響（変化が比較的小さければ）は少ないといえる。なお、天端水深の影響は図-6a、図-6b と同様である。

## (2) クレセント型潜堤を配したデルタ型リーフ

デルタ型リーフの全面にクレセント型潜堤を設置したケースの  $H_0'/L_0$  と  $H_B/H_0'$  ( $H_B$ : 碎波波高) の関係を図-7a、7b に示す（計算条件は表-2 に基づく）。両ケースともデルタ型リーフのみ設置の場合に比べ、碎波波高の顕著な増大が見られ、波高増幅という観点からはクレセント型潜堤の設置が有効であることがわかる。

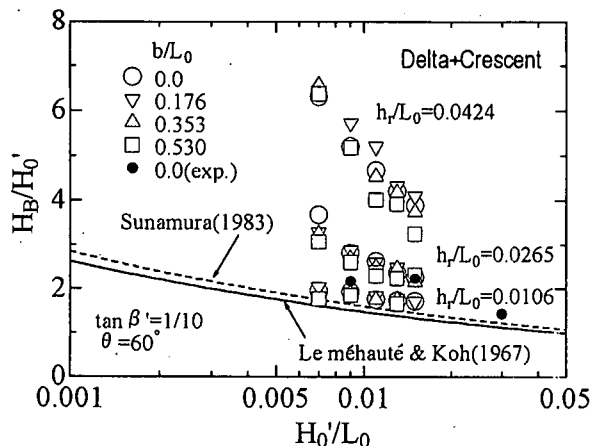


図-7a 碎波波高（頂部幅の影響）

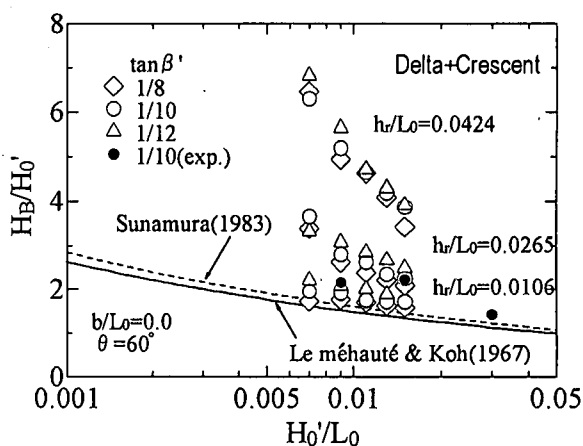


図-7b 碎波波高（リーフ斜面勾配の影響）

### 3. 2 斜め砕波速度 (peel velocity)

peel velocity とは斜め砕波の進行速度のことである。サーフィンの滑走状態ではサーフボードのスピードは peel velocity とほぼ同じか、やや速い程度である。サーフボードを波が追い越すような場合にはその波は "close out" と呼ばれサーフィンには適していない。

Walker et al.<sup>9)</sup> は ハワイでの現地観測などから, peel velocity  $V_s$ , 砕波波高, 斜め砕波角 (peel angle) とサーフィンの難易度との関係を調べている。Walker et al. が作成した図より砕波点での斜め砕波角が  $60^\circ$  前後の場合には, 概ね次のような分類ができる<sup>3)</sup>。

- 初級者  $H_B < 1.0(m)$ ,  $V_s < 3.0(m/s)$   
 中級者  $1.0 < H_B < 2.5(m/s)$ ,  $3.0 < V_s < 7.0(m/s)$   
 上級者  $2.5 < H_B < 5.5(m)$ ,  $7.0 < V_s < 10.0(m/s)$

一方, 緩勾配方程式に準拠した数値計算結果から, 直接 peel velocity を評価することは困難である。そこで, 以下のようにして, 近似的にこれを求めた。

沖から岸方向に  $x$  を考える。砕波点付近では急激な波高減少が生じると考えられる。つまり, 砕波点直後に  $dH/dx$  が最小値を示す。そこで, 砕波条件を満たし,  $d^2H/dx^2=0$  となる位置から, 砕波線を評価した。図-8 はデルタ型リーフ+クレセント型潜堤の場合の  $d^2H/dx^2$  の分布であり, 図中に示すように砕波点付近で  $d^2H/dx^2=0$  となるラインから砕波線や斜め砕波角  $\alpha_B$  が推定できる。さらに砕波点の波速  $C_B$  から

$$V_s = C_B / \sin \alpha_B \quad (6)$$

として, peel velocity を求めた。

このようにして求めた peel velocity と砕波波高の関係を図-9 に示す。図にはデルタ型リーフとクレセント型潜堤の複合構造について求められた実験値 (波高の小さい順に  $H_0'/L_0 = 0.009, 0.015, 0.03$ ) を示している。なお, 実測は砕波状況のビデオ画像から解析されている。波形勾配が 0.009 の場合は実験値の  $V_s$  は計算値の 75% と小さくなっている。これは造波された波高が小さく, 砕波速度の測定精度が低かったことも原因の 1 つと考えている。一方, 最も信頼性の高い波形勾配 0.015 の場合は両者はよく一致しており, 他の計算ケースについても概ね妥当な値が得られていると判断してもよい。

この計算結果から, 周期一定 ( $T \approx 6s$ ) の条件ではリーフ頂部の角度  $\theta$  の変化が  $V_s$  に及ぼす影響はあまり大きくないが,  $\theta = 70^\circ$  では波高の小さな場合にも  $V_s$  は大きく, サーフィンに適さなくなる傾向がある。またデルタ型リーフの前面にクレセント型潜堤を設置したケースでは  $V_s$  はほぼ同じで砕波波高のみが大きくなっている。波高の増大はサーフボードの推進力を大きくするため, 小さな波高でもダイナミックなサーフィンが可能となる。また計算条件の範囲ではほぼ「初級者～中級者に適する波」に合致しており, サーフィンと共存する海岸創造としてデルタ型リーフの有用性が確認される。

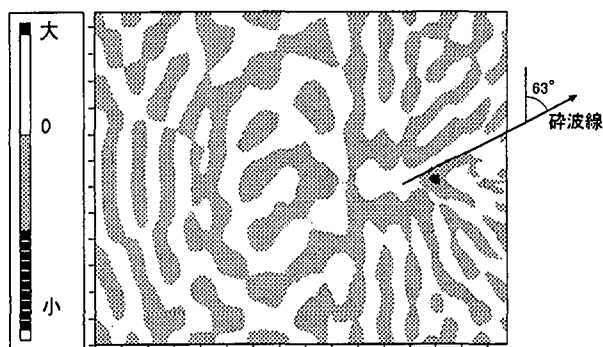


図-8  $d^2H/dx^2$  分布と砕波線

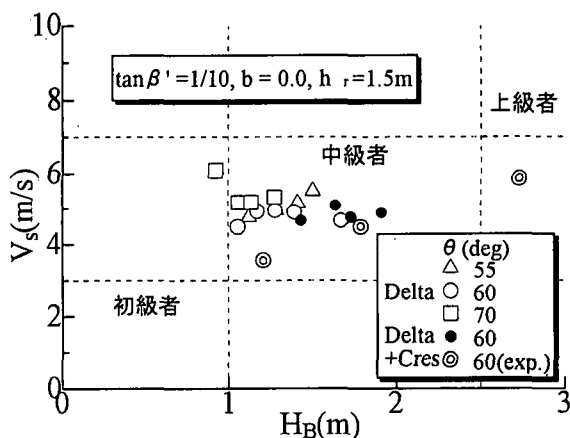


図-9 peel velocity と砕波波高.

#### 4. まとめ

サーフィン共存型構造物としては、その防災機能はもちろんのこと、静穏時に砕波波高を増大させ、かつ良好な斜め砕波（砕波角や peel velocity）を発生させることが重要である。本研究ではデルタ型リーフの形状を決定するいくつかの要素（頂部幅、沖側のり面勾配、頂角）や前面にクレセント型潜堤を設置することの影響がどの程度波浪特性に影響を及ぼすかを数値計算により検討した。この結果得られた結論を以下に示す。

- 1) 波形勾配が大きくなるにつれ、計算値の方が最大波高のピークがより沖にでるものの、波形勾配がサーフィンに適する範囲内では今回の数値計算法は十分適用できる。
- 2) 頂部幅変化が砕波波高の増大に及ぼす影響は小さく、利用可能者数を考慮にいと、ある程度の頂部幅を設けるのが望ましい（ $b/L_0 = 0.4$  前後）。
- 3) 沖側のり面勾配が小さくなるほど、砕波波高は大きくなるが、リーフの延長が長くなること、砕波形式（サーフィンには巻き波型砕波が最適）を考慮に入れると、1/10 程度が妥当である。
- 4) 全ケースにおいて、天端上水深が砕波波高に及ぼす影響は顕著であり、リーフの設計において、最も重要視する要素の一つである。
- 5) 今回の形状変化の範囲では、砕波波高、peel velocity の点で初級者～中級者に適した波の発生が予測される。またデルタ型リーフをクレセント型潜堤との複合構造とすることで、peel velocity はほぼ同じで砕波波高のみが増加し、小さな波高でも快適なサーフィンが可能となり、サーフィン共存型構造物としては有効な方法である。

#### 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・中野孝二・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, pp.229-234.
- 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) 中野 晋・三井 宏・三島豊秋 (1995) : 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, 海洋開発論文集, Vol.11, pp.43-49.
- 5) Yamashita T.(1993):Computational coastal hydraulics with relation to predictions of surge and beach changes, Chapter 4, Doctoral dissertation of Kyoto Univ., pp.245-270.
- 6) Berkoff, J.C.W (1972) : Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th, Int., Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.471-490.
- 7) Dally W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1935) : Wave height variation across beaches of arbitrary profile, Jour. Geoph. Res., Vol.90, No.C6, pp.11917-11927.
- 8) たとえば, 本間 仁監修, 堀川清司編 (1985) : 海岸環境工学, 東大出版会, pp.71-80.
- 9) Walker J.R., R.Q. Palmer and J. K. Kukea (1972) : Recreational surfing on Hawaiian reefs, Proc. of 14th Int., Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.2609-2628.