

サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の流れと漂砂

Littoral Current and Sand Drift around the Delta Type Reef Suitable for Surf-riding

中野 晋*・吉田 善昭**・中野 孝二***・三井 宏*

S. Nakano, Y. Yoshida, K. Nakano, H. Mitsui

The triangular sand bar which often exists around the river mouth has the suitable topography for surf-riding. The delta type artificial reef which imitated this triangular sand bar was newly designed for the shore protection structure. In an experimental wave basin, the characteristics of the wave breaking, the wave run-up, the littoral current and the sand drift were studied. As compared with the groins, the delta type reef has the superior property in the sand drift control and the waverun-up height decrease.

keyword: surf-riding, artificial delta type reef, shore protection

1. はじめに 四国東部は美しい海岸線を有し、日本でも有数のサーフ・ポイントが点在しており、日本全国はもとより、海外からもサーファーが訪れている。著者ら¹⁾は其中でも特に良好なサーフ・ポイントとして多くのファンを集める海部川河口の海底地形に着目し、サーファーからの聞き取り調査、深浅測量、波浪屈折計算から、河口部に形成されたテラス地形がサーフィンのための海岸構造物として Walkerら²⁾が提案しているデルタ型の人工リーフに酷似し、比較的静穏な波浪条件でもサーフィンに適する砕波が生成されることを確認した。

この河口テラス状地形はテラス先端で砕波させるため、消波作用などの波浪制御効果を持つが、これとほぼ同じ形状を持つデルタ型の人工リーフを従来の突堤工法のように複数基設置することにより、面的な漂砂制御などの防災機能が期待できる。これは景観的にも悪影響を及ぼさず、サーフィンなどの海洋スポーツとも共存できる新たな海岸保全施設と考えられる。これをデルタ型リーフと名付け、平面水槽での模型実験により、サーフィンに適した波が発生することを確認し、ついで実用化の決め手となる波の打ち上げ高軽減効果や漂砂制御効果について検討した。

2. 実験方法 実験には、長さ30m、幅15m、深さ0.6mの平面水槽を使用した。

(1) 斜め砕波速度

図-1および表-1に示す模型に、沖波波形勾配0.01~0.03、水深35cmでの入射角30°の5種類の波を作用させ、各ケースにおいて2点間の砕波の時間差より斜め砕波速度を求め

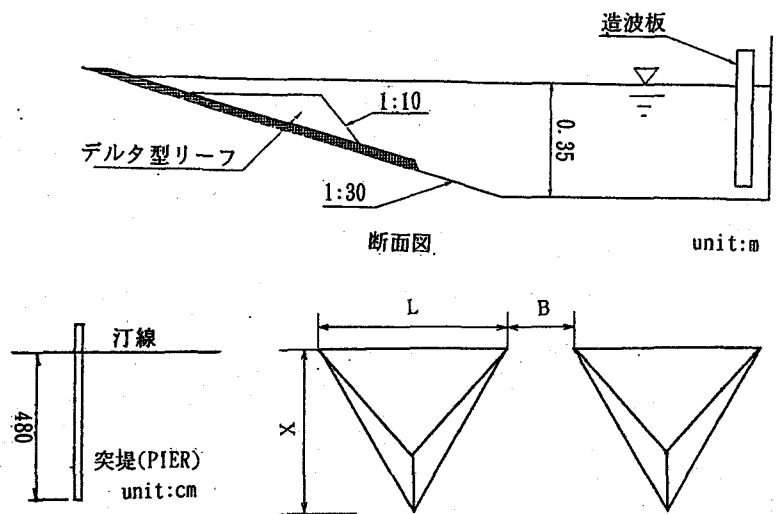


図-1 リーフ模型 (沿岸流速測定)

表-1 リーフ模型寸法 (沿岸流速測定)

	REEF 1	REEF 2	POCKET 1	POCKET 2
X	360	510	240	255
L	415	589	277	295
B	—	—	277	295
天端水深	5	0	3.33	0
現地縮尺	1/20	1/20	1/30	1/40

unit:cm

* 正会員 徳島大学工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島2-1)

** (有) ヨシダ

*** 学生員 徳島大学大学院

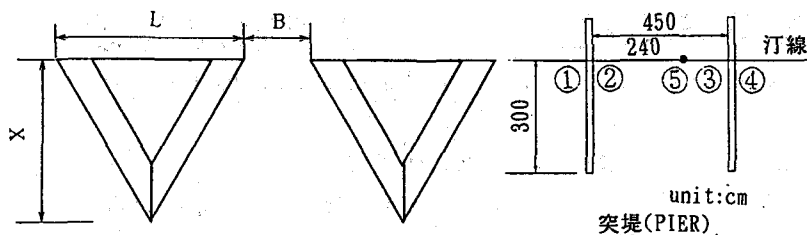


図-2 リーフ模型（漂砂実験）

表-2 リーフ模型寸法（漂砂実験）

	POCKET 3	POCKET 4
X	260	346
L	300	400
B	180	82
天端水深	3	0
現地縮尺	1/35	1/35

unit:cm

た。

(2) 沿岸流の測定

実験模型は、図-2および表-2に示すように、2種類の単独リーフ模型（REEF 1,2）の他に、リーフを2基設置したポケットビーチ2種類、比較対象のための単独突堤（PIER）、自然海浜（NORMAL）の計6種類の模型に対し実験を行った。計画波は斜め砕波速度を測定したときのものと同じである。なお、図中の網掛けは下記の漂砂実験の場合に砂を敷き詰めた範囲である。沿岸流速は染料の移動をビデオ撮影して測定した。また同時に底層での流況を見るために水に浸したおがくずをトレーサーとして投入し、その移動および堆積状況をビデオ撮影した。なお、図中の×印はトレーサーの投入点、薄い網掛けはトレーサーの流出範囲、濃い網掛けは堆積範囲を示している。リーフの寸法をこのように決定した理由は、サーファーが波に乗るには40m～50mの斜め砕波の区間が必要であり、そのためにはリーフの斜辺の長さが100m程度は必要になるからである。

(3) 人工リーフの防災機能についての実験

実験模型は図-2および表-2に示すポケットビーチ2種類（POCKET 3,4）、および比較対照のための自然海浜、連続突堤（PIER）の計4種類を対象とした。図中の網掛け部は前述のように中央粒径 $d_{50}=0.32\text{mm}$ 、比重 $s=2.30$ の海砂を3cmの厚さで敷き詰めた範囲を示す。計画波には沖波波形勾配0.01および0.04、水深35cmでの入射角 30° の2種類の波を選定し、これをリーフ模型に作用させた。波の作用時間は1時間および8時間である。侵食・堆積の判定は、波を作用させた後の地形と初期地形との同一水深の等深線を比較し、前進していれば堆積、後退していれば侵食とした。打ち上げ高は、実験開始直後、地形変化のないうちに波打ち際をビデオ撮影し、静水時の汀線との水平距離を求め、高さに換算したものである。リーフの実験では沿岸流上流側リーフ上流点（最上流点）、リーフ背後およびリーフ間で測定し、突堤の実験では図中に示す①～⑤の地点で測定した。

2. 実験結果および考察

(1) 斜め砕波速度

リーフを設置することにより、いずれの波形勾配でもリーフ斜面に沿ってサーフィンに適した巻き波型砕波が発生することが確認された。斜め砕波速度（peel velocity）はサーフボードの速度にほぼ等しく、サーフィンにとって重要な因子の一つで、次式で定義される。

$$V_s = \frac{C_b}{\sin \alpha_b} \quad (1)$$

ここで、 V_s は peel velocity、 C_b は砕波の波速、 α_b は砕波点での屈折角である。砕波の波速が孤立波理論による波速で近似できると考える。

$$C_b = \sqrt{g h_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{H_b}{h_b} - \frac{3}{20} \left(\frac{H_b}{h_b} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 h_b は砕波水深、 H_b は砕波高である。山田³⁾によると孤立波での砕波高には $H_b/h_b=0.827$ の関係があるので、砕波の波速は砕波高を用いて

$$C_b = 1.44 \sqrt{g H_b} \quad (3)$$

で表される。結局、 V_s は

$$V_s = 1.44 \sqrt{g H_b} / \sin \alpha_b \quad (4)$$

で表される。また H_b 、 h_b は Le Mehaute and Koh⁴⁾の次式

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76 (\tan \beta)^{1/4} \left(\frac{H_0'}{L_0} \right)^{-1/4} \quad (5)$$

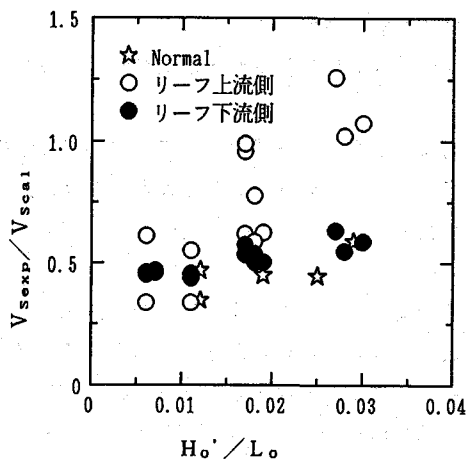


図-3 V_s の実測値と計算値の比較

と合田⁵⁾の碎波限界式を変形した次式

$$\frac{h_b}{L_o} = \log \left(1 - \frac{H_b/L_o}{0.17} \right) / [-1.5\pi \{1 + 15(\tan \beta)^{4/3}\}] \quad (6)$$

さらには、屈折角 α_o を入射角 α_o を用いて、 $\sin^{-1}(\tanh k h_b \sin \alpha_o)$ で表すと、各実験条件ごとに V_s の計算値が求められる。図-3は実測値と計算値の比を波形勾配 H_o'/L_o に対しプロットしたものである。自然海浜、リーフの上流側、下流側のいずれにおいても計算値に比べて実験値が小さい。そこで各ケースごとに $V_{s \text{ exp}}/V_{s \text{ cal}}$ と H_o'/L_o の関係を最小自乗法により、線形近似して評価した。図-4は斜め碎波速度 V_s 、碎波高 H_b 、peel angle α_o (碎波点での屈折角) の関係について Walkerらが整理したものである。図中の一点鎖線はそれぞれサーファーの能力別にサーフィンに適した波の範囲を示したものである。図-5は式(4)の関係を図-3に示した実験結果による補正を加えて Walkerと同じ整理を行ったものである。式(4)の計算では周期や入射角などが影響するが、ここでは実験とほぼ同じ条件で周期だけ 5s と変えた結果である。peel angle などがリーフの上流側と下流側で異なることや計算値も Walkerらが提案した図-4と比べてかなり違った値となっている。なお、Walkerらがどのようにして peel angle を算定したかなどについては述べられていない。

(2) 打ち上げ高

図-6に天端が完全に水中に没しているリーフ(POCKET 1)における換算沖波波形勾配と波の相対打ち上げ高の関係を示す。図中の実線はSaville⁶⁾の斜面勾配1/30の滑面の場合における実験曲線であり、本実験の自然海浜の場合の実験値とよく一致していることがわかる。この図において、波形勾配の小さい通常時の波においては、リーフのどの場所においても波の相対打ち上げ高の低減効果はあまり現れていない。しかし、波形勾配の大きい暴風時の波においてはリーフ最上流点以外では波の相対打ち上げ高は低減している。これは、通常時の波に対しては屈折によるリーフの波エネルギー収束効果は小さく、暴風時の波に対しては収束効果によりそのエネルギーを碎波によって逸散させているものと考えら

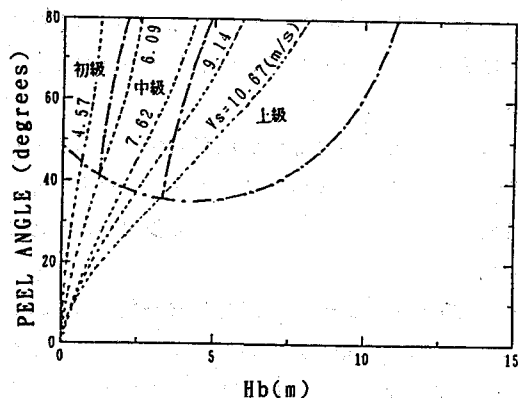


図-4 碎波高と peel angle の関係 (Walker)

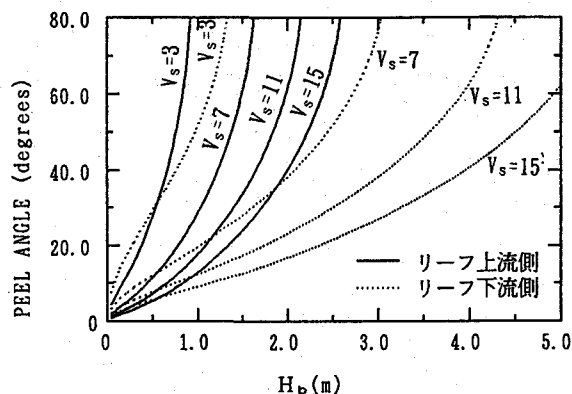


図-5 碎波高と peel angle の関係 (補正計算)

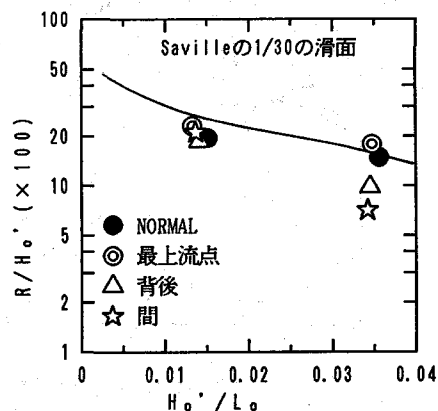


図-6 相対打ち上げ高 (リーフ)

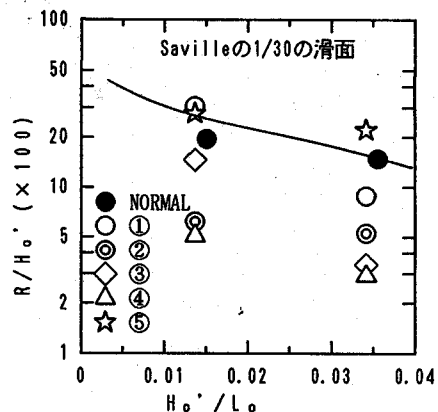


図-7 相対打ち上げ高 (突堤)

れる。なお、リーフ最上流点における波の打ち上げ高の増加は、波動現象そのものによるものではなく、自然海浜における沿岸流がリーフ斜面に沿う斜め碎波による質量輸送とぶつかって生じた平均水位上昇が大部分を占めている。

図-7に突堤における換算沖波波形勾配と波の相対打ち上げ高の関係を示す。突堤基部下流点においては波の相対打ち上げ高は大きく低減しているが、突堤上流点での打ち上げ高は増加している。この原因としては、入射波と上流側突堤による反射波とがここで衝突したためであると考えられる。

(3) 流れと漂砂

図-8にPOCKET 3の通常時8時間後の侵食・堆積図を、図-9に沿岸流速分布図を示す。沿岸流上流側リーフの中央部から上流側に堆積がみられるが、ここは、沿岸流と斜め碎波に伴う質量輸送とが衝突するところであり、両者から運ばれた砂がここに堆積したものと考えられる。また、砂の一部はリーフ上まで運ばれ、天端に堆積していることがわかる。入射波高が小さいためにリーフ間での底質移動量は小さいが、碎波線付近では侵食傾向が見られる。また沿岸流速分布図ではトレーサーが堆積している上流側リーフの碎波線の沖側でも侵食がみられる。これはリーフにより流れが遮られるために砂を移動させるほどの流れにならなかったためと考えられる。

図-10にPOCKET 3の暴風時1時間後の侵食・堆積図を、図-11に沿岸流速分布図を示す。リーフ間に自然海浜では見られなかった堆積が大きな範囲に広がっている。これは、流速分布で見られるように、上流側リーフを回り込んだ砂がリーフ間に堆積すると同時に、沿岸流が下流側リーフに当たり発生した離岸流に運ばれた砂を取り込んだためと考えられる。汀線付近を詳細に観察すると、通常時においても、暴風時においてもリーフ背後では海浜は安定しており、通常時にはリーフ背後の汀線付近が、暴風時にはリーフ間の汀線付近が堆積傾向を示している。

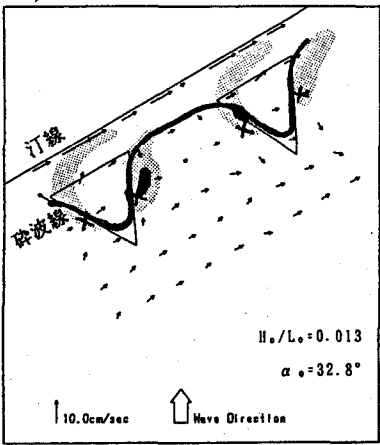


図-8 沿岸流速分布図（通常時）

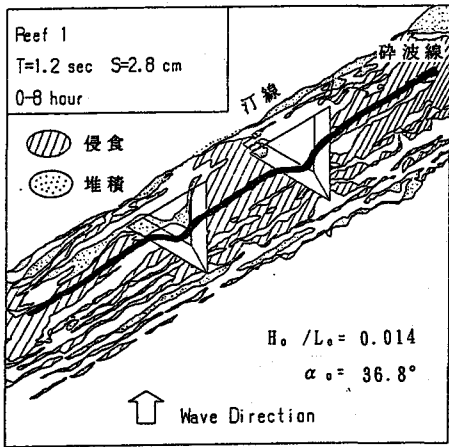


図-9 侵食・堆積図（通常時8時間後）

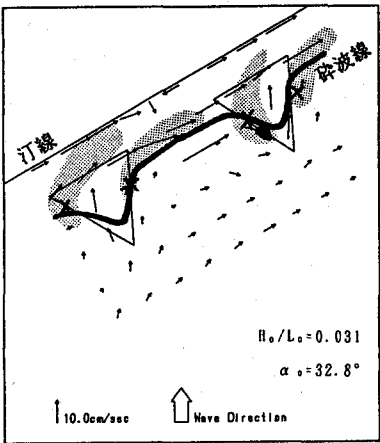


図-10 沿岸流速分布図（暴風時）

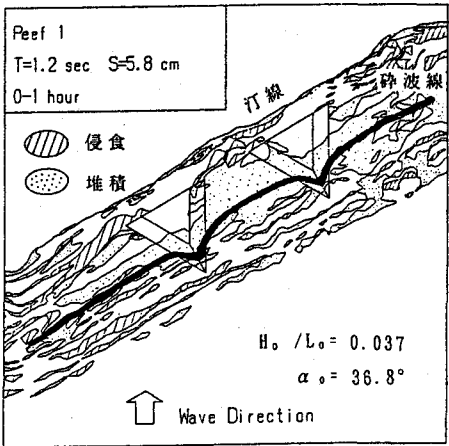


図-11 侵食・堆積図（暴風時1時間後）

図-12 にPOCKET 4の通常時8時間後の侵食・堆積図を、図-13 に沿岸流速分布図を示す。リーフ付近では全体的に堆積傾向がみられるが、波高が小さいので海底地形の変形量は小さい。しかし、沿岸流上流側リーフの上流側では、砕波線に沿った沿岸流の大部分がリーフおよびリーフ上流斜面での斜め砕波による流れに遮られ、最上流点からその先端部にかけて大きく堆積している。

図-14 にPOCKET 4の暴風時8時間後の侵食・堆積図を、図-15 に沿岸流速分布図を示す。波高が大きい波を長時間作用させたために一部で固定床が現れるなど正確な結果は得られていないが、この図からは以下の事実が考察される。給砂がないために沿岸流上流側では大きく侵食域が広がっているが、リーフ間においては砕波線岸側で堆積傾向にあることがわかる。これは、リーフのために砂の流出が抑えられたことに加え、沿岸流速分布図にみられるように、上流側リーフを回り込む流れにより取り込んだ砂がここで堆積したためと考えられる。

図-16 に突堤2基設置の通常時8時間後の侵食・堆積図を、図-17 に突堤1基設置の場合の沿岸流速分布図を示す。上流側突堤上流点では、よく知られているようにリーフの場合と同様な理由により堆積がみられる。また、偶然に突堤間隔が適正であったためか、上流側突堤の基部下流点で侵食することなく堆積している。

図-18 に突堤2基設置の暴風時1時間後の侵食・堆積図を、図-19 に突堤1基設置の場合の沿岸流速分布図を示す。暴風時に広く堆積していたリーフの場合と異なり、全体的に侵食傾向にあることがわかる。ただし、目視観測によればその侵食量は余り大きくなかった。この理由は上流側突堤の上流側壁面に沿う岸向きの強い流れのために、突堤間への砂の流れを防止したためと考えられる。

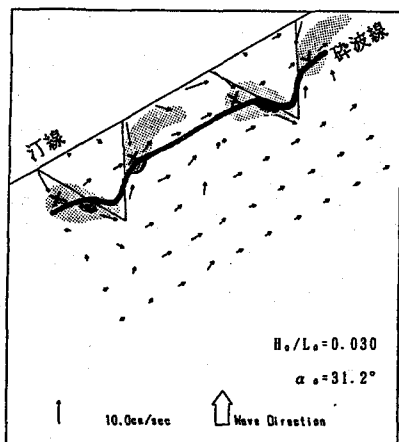


図-12 沿岸流速分布図（通常時）

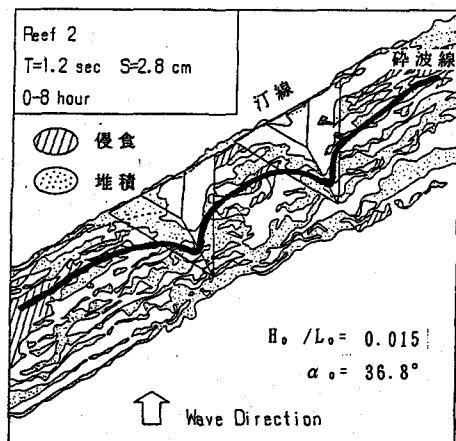


図-13 侵食・堆積図（通常時8時間後）

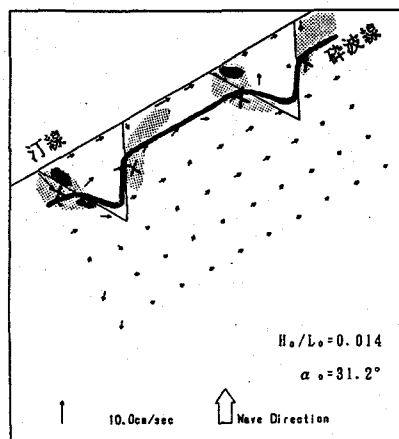


図-14 沿岸流速分布図（暴風時）

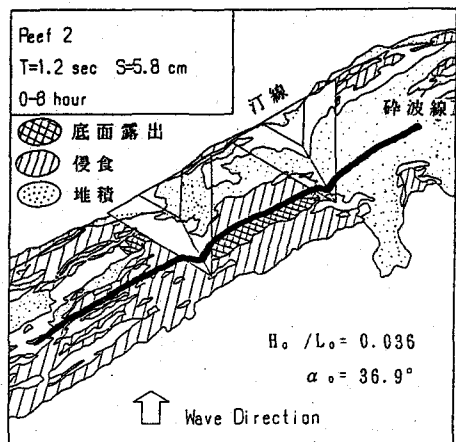


図-15 侵食・堆積図（暴風時8時間後）

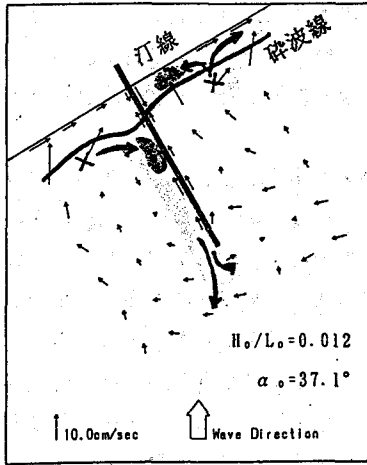


図-16 沿岸流速分布図（通常時）

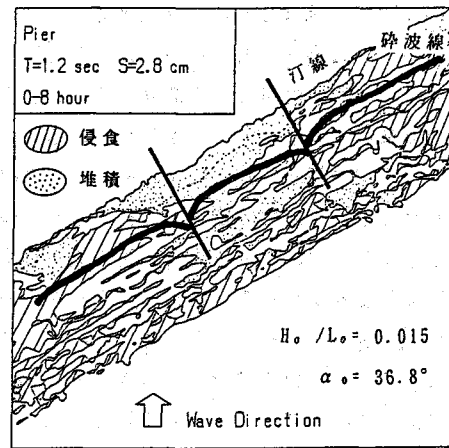


図-17 侵食・堆積図（通常時8時間後）

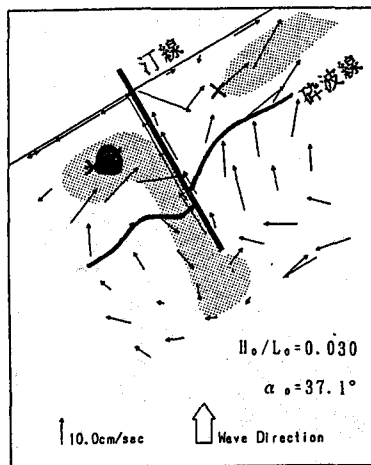


図-18 沿岸流速分布図（暴風時）

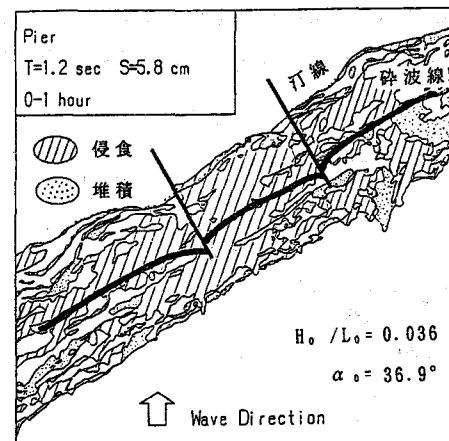


図-19 侵食・堆積図（暴風時1時間後）

4. おわりに

サーフィンに適した波浪変形を引き起こすとともに、防災機能も備えている没水型海岸構造物の実現可能性を検討するために模型実験を行った。これにより得られた結果を以下に要約する。

- 1) デルタ型リーフを設置することにより、サーフィンに適した砕波が得られる。
- 2) デルタ型リーフを設置した場合、リーフ最上流点を除けば、打ち上げ高の低減効果は期待できる。ただし、最上流点における打ち上げ高の増加は波動そのものによるものではなく、沿岸流により運ばれた流体が、リーフ斜面に沿う砕波の質量輸送とぶつかって平均水位が上昇したものである。したがって、リーフを多数設置する場合にはリーフ群の最上流点にだけこの現象が現れるが、突堤でみられるような局所的な打ち上げ高の増加は発生しないと考えられる。
- 3) デルタ型リーフ設置により、通常時の波に対しても暴風時の波に対してもリーフ背後の海浜は安定しており、通常時の波ではリーフ背後が、暴風時の波に対してはリーフ間の汀線が堆積傾向を示す。

参考文献

- 1) 吉田善昭, 中野晋, 増味康彰: 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, 1991
- 2) Walker, J. R., Palmer, P. Q. and Kaukea, J. K. : Recreational Surfing on Hawaiian Reefs, 14th. Coastal Eng. pp. 2609-2628, 1972.
- 3) たとえば, 水村和正: 海岸海洋工学, 60p., 共立出版, 1992.
- 4), 5) たとえば, 本間 仁監修: 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 74-75, 1985.
- 6) Saville, T., Jr. : Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 691-399, 1958.