

サーフィンに適する波と人工リーフの関係

A fundamental study on artificial reefs that serve surf-riding points

吉田善昭*・中野 晋**・増味康彰***・三井 宏**

Yoshiaki Yoshida, Susumu Nakano, Yasuaki Masumi and Hiroshi Mitsui

After drawing up the refraction diagrams for variable incident waves at the famous surf-riding points in East Shikoku, it was found that the wave convergence and the peel angle (refraction angle at breaking point) were important factors at surf-riding. Further, the characteristics of breakers and their peel velocity were measured at straight reef models exposed obliquely in the incident waves.

Keyword: surf-riding, artificial reef, peel velocity

1. はじめに

近年の国民生活様式の変化に対応して海洋性レクリエーションが一層盛んになってきており、リゾート開発やレジャー施設に対する関心、欲求が高まりつつある。その中でもサーフingは、これまでマイナー・スポーツのイメージがあったが、サーフing人口は増加傾向にあり、将来性豊かなマリンスポーツになろうとしている。事実、わが国のサーフing適地には日本全国はもとよりアメリカ、オーストラリア、ニュージーランドなどからもサーフing愛好家が訪れ、冬期にも続行されている。このようにサーフingは無シーズン化、広域化、国際化の傾向にあり、サーフing適地は貴重な人集めの場として地域開発、地域活性化にたいへん重要な役割を果たそうとしている。

わが国の海岸の多くは離岸堤、突堤、直立護岸などの海岸構造物が建設されているが、これらの海岸構造物は防災機能を重視する反面、景観や親水性に対する配慮が欠けており、従来型の海岸構造物に対する見直しが始められている。海洋レジャーに対する配慮についても同様であり、海岸構造物の建設に伴い、愛好家にとって貴重なサーフing適地が消滅してしまった例も決して少なくない。こうした反省から漂砂や波浪制御のため、最近では従来型の離岸堤に代わって、景観上の問題が少ない人工リーフなどの没水型波浪制御構造物を採用する地域が増加している。これらは建設費用が高いこと、漁船にとっては暗礁となることなどの短所があるが、通常時の波はそのまま通過させ、暴風時の大波を減衰させること、構造物が見えず景観上好ましい、海浜と人とを分断しないなどの長所を有している。また急に浅くなることや波の収れんのため、没水型構造物上での砕波波高が大きくなる可能性が高いことから考えてもサーフingにも適する波浪制御効果が期待できる。

波浪制御効果の高い没水型海岸構造物として円弧状のテラス型的人工リーフや天端幅が一定で直線状であるが、天端高が両端で低くなっている人工リーフが考えられる。どちらも波の位相の変化による弱い集波機能を持っている。これらはサーフingが行われている海岸部にも設置可能であり、サーフingにも適する波浪制御構造物として建設が可能と考えられる。

このような人工リーフの形状を決定するためには、サーフing適地として知られた海岸の海底地形が参考となる。そこで、本研究では四国東部地区の代表的なサーフ・ポイントの海底地形測量を行い、その特徴を把握するとともに、波の屈折計算から波浪変形特性を検討した。さらに没水海岸構造物の内、最も基本的な直線形状人工リーフについての模型実験を行い、このリーフ上での砕波特性を調べ、サーフingに適する波と海岸構造物の諸元との関係について検討を加えた。

2. サーフing適地の海底地形調査

2. 1 調査方法

徳島県海部郡の海部川河口付近において、現地調査を平成2年12月10, 11日に実施した。ここでのサーフing

* 学生員 徳島大学大学院

** 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)

*** 学生員 神戸大学大学院

愛好家からの聞き取り調査によると平成2年の夏以降は、サーフィンにとってはここ数年来で最も良い波（巻き波型で碎波高が大きく、長時間斜め碎波が継続する）が発生しているとのことであった。その原因として、夏以降4つの大きな台風（9019, 9020, 9021, 9028号）により、河口付近の海底地形が大きく変化し、サーフィンに適した海底地形を形成したのではないかと考えられる。そこで、これを確認するために海部川河口部の深浅測量を行い、平成元年の海底地形との違いを比較する。

汀線測量では、図-1に示すT1, T2地点にトランシットを設置し、汀線に立てたポールを三角測量により計8点測角した。深浅測量は、T1, T2地点にトランシットを、D地点に距離計を設置し、測深器を舷側中央付近に備えた舟が設定した始点に近づいたら、距離計の方から合図を送り、舟を真東方向に転進させるとともに測深器を作動させた。舟が沖に向かって等速度になった時点でT1, T2に合図を送り、測角すると同時に記録紙に印を入れ、この点を始点とした。その後、水深が15mを越えた点を終点とし、始点の場合と同様にして記録紙に印を入れると同時に測角した。この方法により、計11本の測線を得て図-1に示す等深線図を作成した。また、徳島県の調査による平成元年12月海部川河口部の等深線図を図-2に示す。この2つの等深線図より水深を読み取り、これより行う屈折計算の水深データとした。

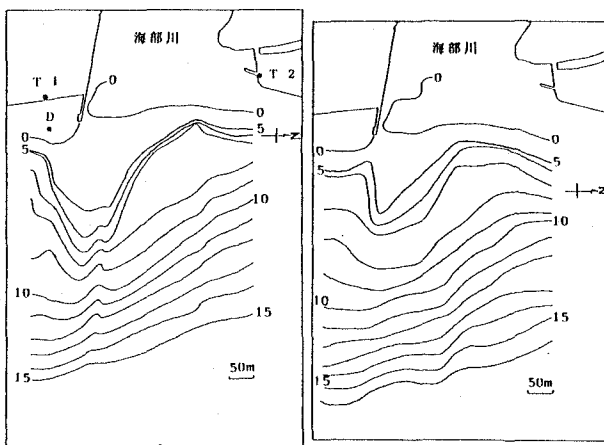


図-1 等深線図(平成2年) 図-2 等深線図(平成元年)

2.2 屈折計算

ここでは、西日本を代表するサーフ・ポイントである海部川河口部および高知県安芸郡東洋町生見海岸における入射波の収束状況を明らかにするために、水深変化のみを考慮に入れた屈折図を作成する。波の屈折計算法には微小振幅波理論によるもの以外に波のエネルギー方程式によるもの、wave action 方程式によるもの、放物型方程式によるものなどがある。この研究では井島¹⁾により紹介された屈折計算法を採用した。以下にその概要を紹介する。図-3に示す波向線と波峰線に対して以下の記号を用いる。

- α : 点Pにおける波向線とx軸とのなす角
- c : 点Pにおける波速
- D_f : 点Pでの波向線 O_1 と波向線 O_2 の微小距離
- D_s : 点Pでの波峰線 F_1 と波峰線 F_2 の微小距離

波向線の角度の変化は次式で与える。

$$\frac{D\alpha}{Ds} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{Dc}{Df} \quad \dots\dots\dots (1)$$

これは、s方向の α の変化を波峰線方向fへの波速cの変化で表したものである。この式の右辺の微分は

$$\frac{Dc}{Df} = \frac{\partial c}{\partial x} \frac{dx}{df} + \frac{\partial c}{\partial y} \frac{dy}{df} \quad \dots\dots\dots (2)$$

であるから、 $\Delta s = c \Delta t$ の関係を用いてこれらを整理すると、x, y座標についての波向線の角度の変化を示す次式が得られる。

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta t} = \frac{\partial c}{\partial x} \sin \alpha - \frac{\partial c}{\partial y} \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

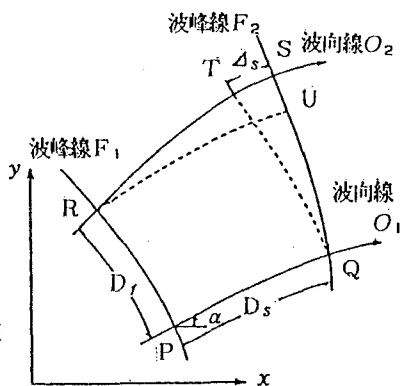


図-3 屈折する場合の波向線と波峰線

x, y平面での波速cの分布が分かれば、上式により波向線の角度の変化量 $d\alpha$ を求めることができる。すなわち、dt時間ごとに波の位置および波向線の方向が求まることになる。本研究のプログラムでは、まず各格子点での水深hを与え、これらと波の周期から各格子点でのcを求めた。任意地点の水深、波速、 $\Delta c / \Delta x$, $\Delta c / \Delta y$ を求めるには、その地点の回りの格子点のそれぞれの値から、面積比を用いて内挿した。

2.3 計算結果と考察

海部川河口部における平成元年、および2年の周期12秒、入射角が 90° （東向きを 0° とし反時計回りに測る）の場合の屈折図をそれぞれ図-4 および 5 に示す。図中の破線は波向線で、これが収束している地点は図中に斜線で示すサーフ・ポイントと一致していることが分かる。これらの図を比較すると、サーフィンに適した碎波が起きることが報告されている平成2年の波向線は、明らかに平成元年に比べ収束の度合いが強い。したがって、

平成2年の方が河口テラスを中心として大きい波高が発生していることが分かる、また、平成2年の河口テラスは平成元年に比べ沖へ大きく伸びている。このため、サーフィンを行うことのできる範囲が広くなり、左右どちらの方向にも斜め砕波が長い距離起きることが分かる。平成2年の河口テラスの輪郭ははっきりしており、その斜面は急勾配でステップ状である。このため、巻き波型砕波が発生し易いと思われる。このような条件が重なって平成2年の海部川河口部で近年にないサーフィンに適した砕波が起きたと考えられる。次に平成2年の入射角 70° 、および 80° の場合の屈折図を図-6、および7に示す。これによると、入射角が 70° の場合に波の収束の度合いが大きく、南東のうねりが入ってきた場合に適した砕波が起きるというサーファーへの聞き取り調査結果と一致している。

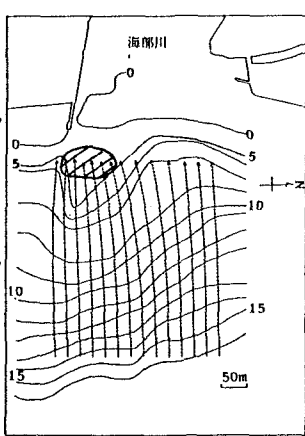


図-4 屈折図（平成元年）

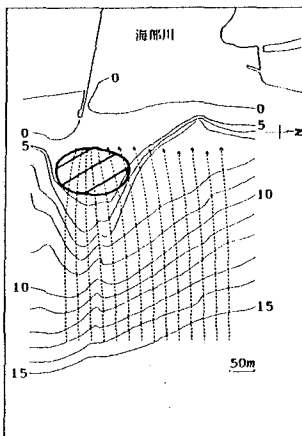


図-5 屈折図（平成2年）

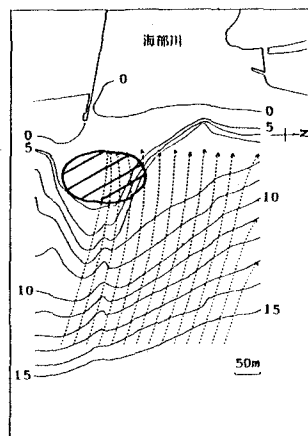


図-6 屈折図（入射角 70° ）

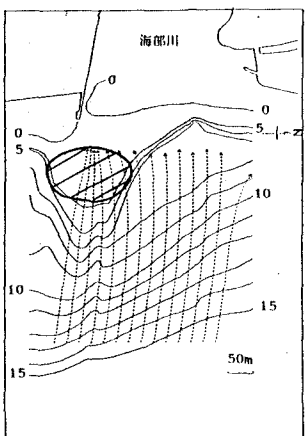


図-7 屈折図（入射角 80° ）

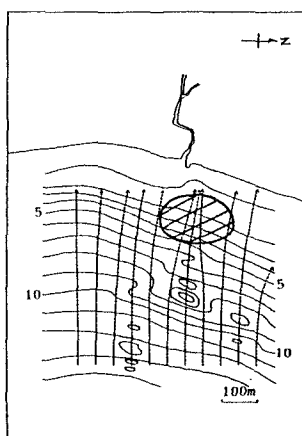


図-8 屈折図（入射角 90° ）

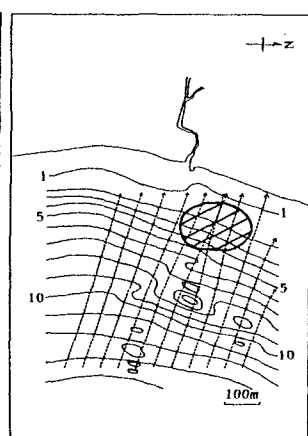


図-9 屈折図（入射角 70° ）

生見海岸の周期12秒、入射角 90° および 70° の場合の屈折図をそれぞれ図-8 および 9 に示す。海底に楕円型の突起が存在するが、これは暗礁である。この周辺の等深線が沖側へ張り出しているので波向線は収束し、この収束地点は図中に斜線で示すサーフ・ポイントと一致している。海部川河口部とは異なり、入射角による波向線の収束度の著しい相違は生見海岸には存在しないようである。ただし、比較的大きい波が入射する場合には暗礁周辺の海底地形によって波は収束し、比較的小さい波が入射する場合には暗礁によって波は収束し、それぞれ背後にサーフポイントが生じるものと思われる。つまり、水深変化が2段となっているので、多種の波に対応できるものと思われる。

3. 人工リーフ上での砕波の特性

前述のようにサーフィンに適する海底地形の1つは、河口テラスのようにその上を伝播する波浪の波向線が収束し、波高の大きい波が形成されるとともに、斜め砕波が発生しやすいような地形であると類推される。このような没水型海岸構造物の基本型は直線状の人工リーフであり、これに斜めに波が入射する場合の砕波特性の把握が、サーフィンと共存できる海岸構造物を検討するうえで特に重要であると考えられる。そこで模型実験により直線状人工リーフに斜め入射する場合の砕波特性を調べた。

3.1 実験装置と方法

実験は図-10 に示す $30\text{m} \times 15\text{m}$ 、深さ 0.6m のコンクリート製平面造波水槽を用いた。波高は図に示すように沖側のA点に1台、人工リーフ付近のB点に10cm 間隔に汀線に直角に4台、計5台の容量波高計（計測技研，CH-306）を設置して測定した。これらの容量式波高計から得られるアナログ信号はデジタルデータレコーダ（TEAC DR-F1）でフロッピーディスクに収録した。実験モデルとしては自然海浜1種類、人工リーフ3種類の計4種類

を用いた。人工リーフの大きさは図-11 に示す3種類で、これらは全て中央粒径3cmの砕石を用いて作成した。人工リーフの天端上の水深はいずれも10cmである。実験方法は自然海浜、人工リーフの各モデルとも、

ほぼ無風状態の気象条件の

下で同様な方法で実験を行った。

実験計画波は表-1 に示す通常時3種類と荒天時2種類の計5種類である。

実験では造波直前からデータ収

録を開始し、各測定点の静止水位

を測定した後に造波機をスタートさせ、A点（沖波波高）およびB点（砕波点付近）の波高を所定のデータ数（60秒間、3000個）だけ収録した。計6回同一条件の測定を行い、B点の波高計を逐次移動させ、砕波前の点から砕波後の点まで10cm間隔で計24点測定した。

peel velocity は、平面水槽の斜面部とリーフ上にあらかじめ1m間隔で描き入れてあるメッシュの2点間の波峰の移動時間をストップウォッチで測定して求めた。

3. 2 実験結果および考察

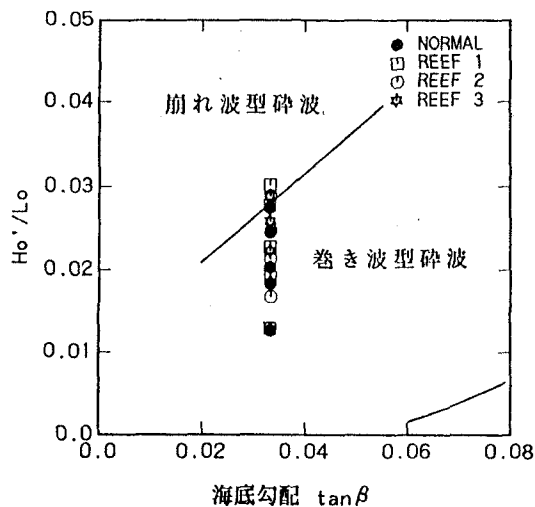


図-12 海底勾配と換算沖波波形勾配

(1) 砕波形式

サーフィンに適する波の要因として、砕波形式、砕波高、後に説明するpeel velocityの3つがある。リーフを設置した場合の斜め砕波形式の実験結果を、砕波点での換算沖波波高 H_0' を用いて図-12に示す。図中の実線は、海底勾配 $\tan \beta$ と沖波波形勾配 H_0'/L_0 とによる砕波形式の分類線²⁾で、本実験結果では全ケースが巻き波型砕波であるのに対し、分類図では少数の崩れ波型砕波が存在することになる。実験結果は斜め入射波によるものであり、この分類図は直進入射波によるもので、断言はできないが、崩れ波型砕波が発生している海浜であっても、リーフを設置することにより、巻き波型砕波に変えられる可能性をこの図は示していると言える。

(2) 砕波高

砕波高 H_b と砕波水深 h_b の実験結果を整理して、限界波高比³⁾と h_b/L_0 の関係を図-13に、相対砕波水深と換算沖波波形勾配の関係³⁾を図-14に、相対砕波高と換算沖波波形勾配の関係³⁾を図-15に示す。図中の実線は

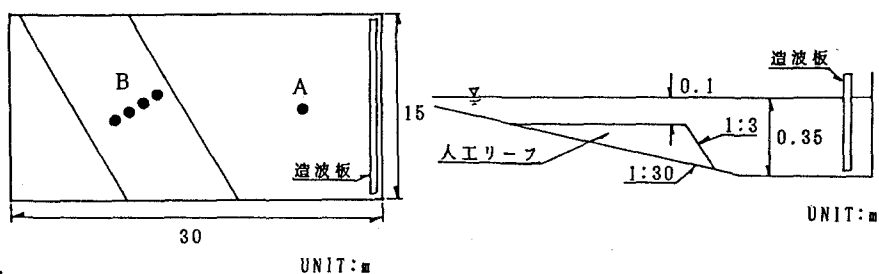


図-10 実験水槽

REEF NO.	1	2	3
x	135	270	540
h	5.0	10.0	20.0

UNIT:cm

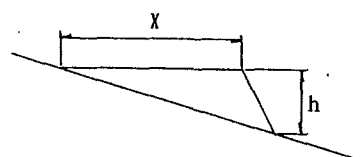


図-11 リーフモデル

表-1 実験計画波

WAVE	通常時			荒天時	
T (sec)	1.3	1.5	1.7	1.3	1.5
H_0'/L_0	0.030	0.022	0.017	0.038	0.034

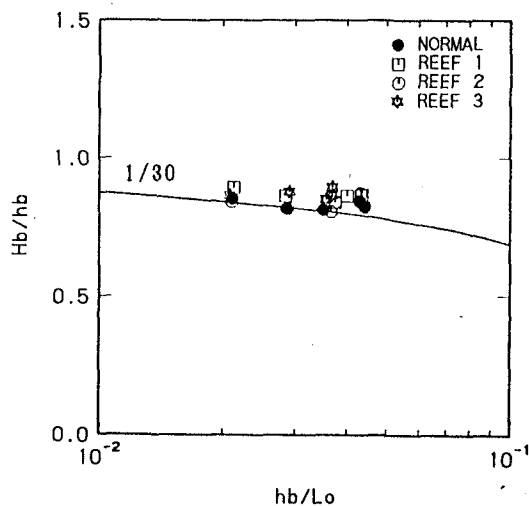


図-13 進行波の限界波高比

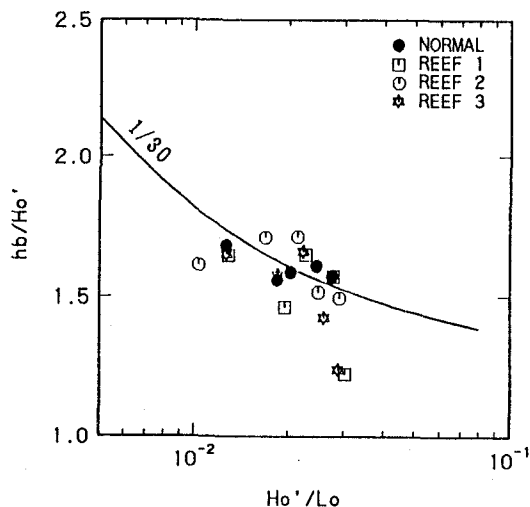


図-14 砕波水深と換算沖波波形勾配

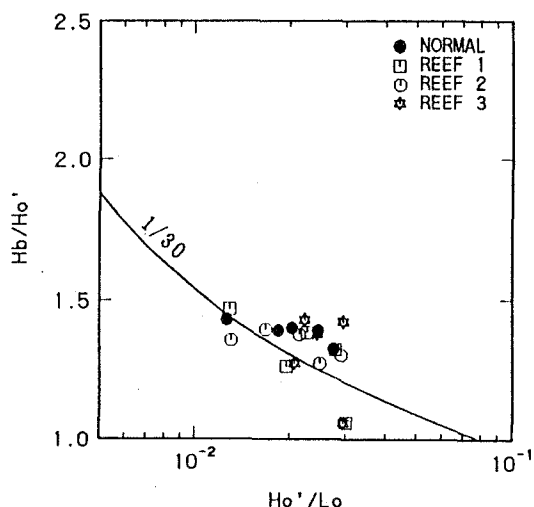


図-15 砕波高と換算沖波波形勾配

合田³⁾が多くの研究者によって得られた実験データを系統的に整理して作成した実験曲線のうち、実験水槽の斜面勾配1/30と一致する曲線である。図-13によると自然海浜モデルの H_b/h_o の実験結果は合田の実験曲線に一致していることが分かる。リーフ・モデルでは自然海浜よりも H_b/h_o の値はやや大きくなる傾向が見られる。この理由として砕波点がステップの先端付近であり、一定勾配の自然海浜と比較するとかなり急勾配となっているためと思われる。図-14によると自然海浜モデルの相対砕波水深は合田の実験曲線にほぼ一致していると言える。各リーフモデルの値は相当ばらつきがあるが、自然海浜および各リーフ間での著しい相違は見られない。このばらつきの原因は、砕石により作成したリーフ地形の不規則性によるものと思われる。図-15においても、自然海浜モデルの相対砕波高は合田の実験曲線にほぼ一致している。この場合も図-14の場合と同様に、リーフ・モデルの値がばらついているが、自然海浜および各リーフ間での著しい相違は認められない。したがって、リーフによる砕波高の増大効果はあまり期待できない。

(3) peel velocity

サーフィンにおける波の用語を図-16に示す。図中において波頂が左から右へチューブを形成しながら移動しているが、この移動速度をpeel velocityと言い、サーフィンにとって最も重要な因子である。

Walker et al⁴⁾は peel velocity, 砕波高 H_b , peel angle の関係を求め、peel

velocityがサーフ・ボードの速度に等しく、砕波高と peel velocity が大きいほど、優れたサーフィン技術を要するとして、図-17に示す破線および一点鎖線を提案している。図中の実線は実験結果に基づく補正値を用いて、以下の方法で求めた計算結果である。すなわち、孤立波理論による波速は次式で示される。

$$C_b = \sqrt{g h_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{H_b}{h_b} - \frac{3}{20} \left(\frac{H_b}{h_b} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots (4)$$

孤立波理論による $H_b/h_o = 0.83$ を上式に代入すれば、砕波の波速は次式のように砕波高と与えられる。

$$C_b = 1.440 \sqrt{g H_b}$$

peel velocity は定義から考えると斜め砕波の波速 $C_b / \sin \alpha_b$ (peel angle は砕波点での屈折角 α_b であると考えられる) に等しい。上式の孤立波理論により算定した $C_b / \sin \alpha_b$ の値は、実験で測定した V_s の1.56倍であったので、次式のように補正する。

$$V_s = (C_b / \sin \alpha_b) / 1.56 \quad \dots\dots (5)$$

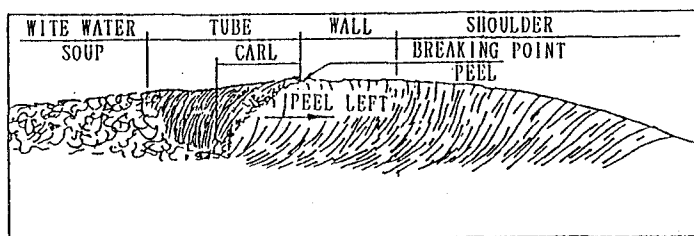


図-16 サーフィンにおける波の説明

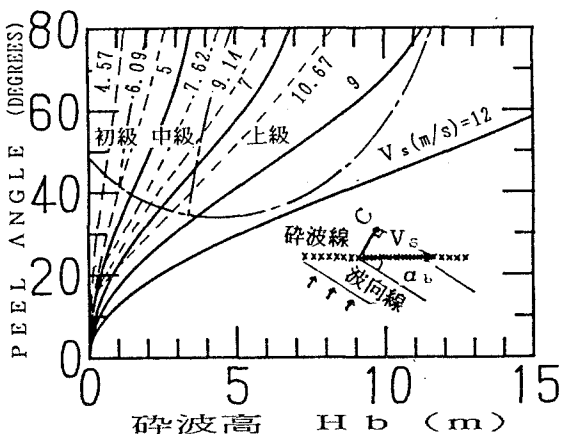


図-17 砕波高とpeel angleの関係

この式を変形すれば、次式のように V_s をパラメータとする H_b と α_b の関係が得られる。

$$\alpha_b = \sin^{-1} \left(\frac{C_b}{1.56 V_s} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{0.914 \sqrt{g H_b}}{V_s} \right) \dots\dots\dots (6)$$

図中の実線はこの方法による計算結果である。同一peel angle, 砕波高においてはWalker が破線で示したpeel velocityよりかなり小さい値となっている。

(4) 波の打ち上げ高

相対打ち上げ高 R/H_0 とsurf similarity parameter ξ の関係を図-18 に、相対打ち上げ高 R/H_0 と波形勾配 H_0/L_0 の関係を図-19 に示す。 ξ の増加, H_0/L_0 の減少とともに R/H_0 は増加するという、従来と同様の傾向を示している。パラメータに取ったリーフの大きさにより、明らかに相対打ち上げ高の値は異なり、リーフの天端幅が大きいほど打ち上げ高が減少することが分かる。

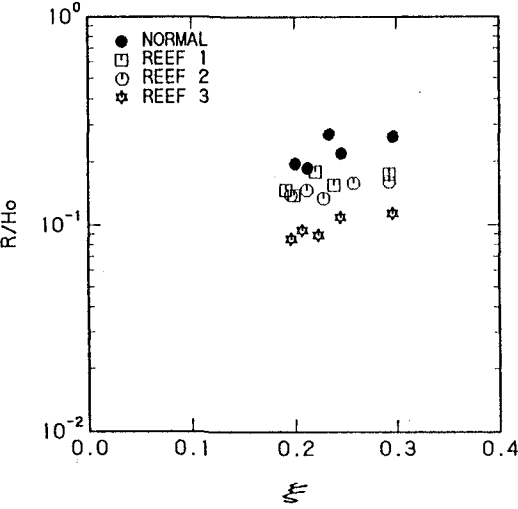


図-18 相対打ち上げ高と ξ の関係

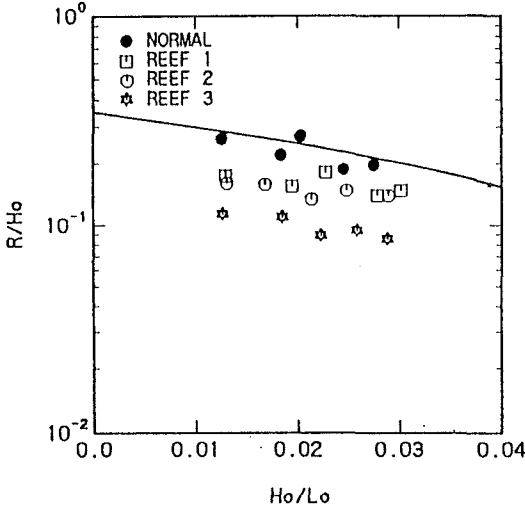


図-19 相対打ち上げ高と沖波波形勾配の関係

4. おわりに

サーフィンにとって好都合な現地海底地形を実測して屈折図を作成するとともに、人工リーフを設置した直線海岸における斜め砕波の模型実験を行った。その結果は以下のように要約される。現地の海底地形は河口テラス状が良い。また、模型実験においてはリーフを設置したことにより、砕波形式の改善がみられたが砕波高についてはあまり変化はなかった。peel velocity は従来の研究に比べかなり小さな値となっている。

ポケットビーチを形成させる人工岬がサーフィンと共存可能な海岸侵食対策工法として有望なのではないかと思われるので、今後はこの人工岬における斜め砕波の特性を詳細に検討する予定である。

謝辞

深浅測量図など貴重な資料を提供して頂いた徳島県日和佐土木事務所、高知県土木部、海底地形測量に御協力頂いた榎大竹組の関係各位、ならびにサーフィンの波について御助言頂いた徳島大学歯学部助手の宮本雅司先生、サーフショップ・ブルーリバーの出井通利氏、御助言のみならず貴重なサーフィンについての情報を提供して頂いたBOBサーフショップの新居昌也氏に感謝の意を表します。

参考文献

1)たとえば、井島武夫：海岸工学，pp.106-113，朝倉書店，1970
2)たとえば、堀川清司監修：海岸環境工学，97p，東京大学出版会，1989
3)たとえば、合田良実・佐藤昭二：海岸・港湾（新訂版），59p，彰国社，1981
4)Pratte T.P., J.R. Walker, PhD.P.E., P.E. Gadd and C.B. Leidersdorf : A new wave on the horizon towards building surfing reefs nearshore, Coastal Zone,1989, pp.3403-3411