

サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の波浪特性

中野 晋*・三島豊秋**・中野孝二***・三井 宏****

1. はじめに

近年、マリンスポーツが盛んになっており、海洋リゾート施設への関心が高まっている。これまでサーフィンはマリンスポーツの中では少数派であったが、着実にその人口は増加しており、地域によって活性化を図る上で人集めの材料としても重要なスポーツと考えられている。

図-1は徳島県海部川河口部の深浅図(平成2年12月)である。ここは日本有数のサーフポイントとして知られているが、平成2年は19, 20, 21, 28号台風時の出水で河口テラスが発達し、入射波がテラス上で集中する状況であったことがわかる。地元のサーファーによると測量の前後は中・上級者サーファーに最適な碎波波高2m程度の巻き波がテラス先端付近で発生し、テラスの等深線に沿って長時間滑走できたようである。サーフィンのメッカであるハワイのワイメアやパイプラインも海底に張り出したテラス地形が波の集中を起し、サーフィンに適する波の発生要因となっている(吉田, 1993)。

しかしこうしたサーフポイントの問題点の1つは海底地形が波や流れによって変化するため、発生する波が安定的でないことである。そのため、サーフィンに適する海底地形を人工的に造成することが考えられる。近年景観面、防災面から人工リーフが注目されているが、サーフィン利用のためにも良好な特性を持つならば、防災機能に加えて、景観や親水性、特にレジャー面から有益である新しい多目的海岸構造物になり得ると思われる。

本研究では、サーフィン海岸でみられる河口テラス形状を模擬したデルタ型リーフの有用性を調べるため、デルタ型リーフとサーフィン適性の関係、リーフ周辺の波浪変形特性について実験と計算を通し検討する。

2. リーフ形状とサーフィン適性

サーフィンに適する波を考える上で重要な3要素は碎波高、碎波形式、peel velocity(斜め碎波の進行速度、

図-2参照)である。このうち碎波高 H_b と peel velocity V_s はサーフィンの難易度と関係し、Walker et al. (1972)の作成した図から碎波点での屈折角 α_b が 60° 前後では概ね次のように分類される。

初級者 $H_b < 1.0\text{ m}$, $V_s < 3.0\text{ m/s}$

中級者 $1.0 < H_b < 2.5\text{ m}$, $3.0 < V_s < 7.0\text{ m/s}$

上級者 $2.5 < H_b < 5.5\text{ m}$, $7.0 < V_s < 10.0\text{ m/s}$

またサーフィンにはチューブに代表される巻き波型碎波が最適であるが、surf similarity parameter ξ_b が次の関係を満たす場合に巻き波型になることが知られている。

$$0.4 < \xi_b < 2.0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\xi_b = \tan \beta (H_b/L_0)^{-1/2} \dots\dots\dots (2)$$

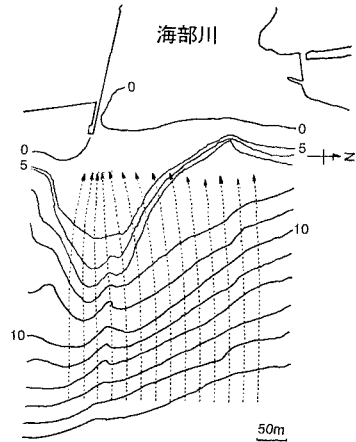


図-1 海部川河口の海底地形と屈折図

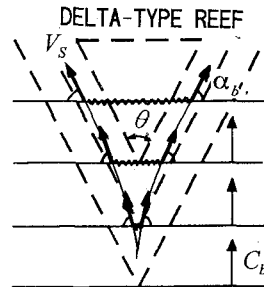


図-2 デルタ型リーフと peel velocity

* 正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科
 ** 正会員 工博 徳島大学助手 工学部建設工学科
 *** 正会員 工修 (株)大林組 大阪本店
 **** 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科

ここに、 $\tan \beta$ は海底勾配、 L_0 は深海波長である。

のり勾配が1/10のデルタ型リーフを想定し、最も基本的な直入射の場合の人工リーフののり斜面上の砕波とリーフ頂角 θ の関係調べる。のり斜面上や斜め入射の場合の砕波限界は明らかでないため、一様勾配海浜でのLe Méhauté and Koh (1967), 合田 (1973) の砕波指標を用いる。

$$H_b/L_0 = 0.76(\tan \beta)^{1/7}(H'_0/L_0)^{3/4} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right\} \right] \dots\dots\dots (4)$$

また、斜面上での波速 C_b を孤立波理論の

$$C_b = \sqrt{gh_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{H_b}{h_b} - \frac{3}{20} \left(\frac{H_b}{h_b} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (5)$$

で与える。ここに、 h_b は砕波水深、 H'_0 は換算沖波波高である。砕波はほぼデルタ型リーフの側面に沿って進行するので、斜め砕波の進行速度 V_s は

$$V_s = C_b / \sin \alpha_b = C_b / \cos(\theta/2) \dots\dots\dots (6)$$

で表される。ここに、 α_b は斜め砕波の進行方向と波峰線とがなす角で、 $\alpha_b \cong \pi - \theta/2$ である。以上の関係を用いて、リーフ頂角別に初級者・中級者のサーファーに適する波浪条件を計算したものを図-3に示す。周期を変化させて初級者、中級者の境界の H_b と V_s を計算したものでそれぞれの境界値と砕波限界、巻き波型砕波形式の限界を示す $\xi_0 = 0.4$ の曲線に囲まれた領域がそれぞれの最適な波浪条件範囲である。頂角が大きくなると α_b が小さくなり、 V_s が大きくなる。したがって頂角 60° のリーフは初・

中級者の広い範囲のサーファーに適するが、 90° のリーフは上級者向けの施設となることがわかる。また頂角が狭くなるとリーフの延長が長くなることや砕波の立ち上がり帯が狭くなり、同時にサーフィンできる範囲が狭くなるなど不利となる。したがってサーフィン共存型のリーフとしては頂角 60° 前後が適切であると思われる。

3. デルタ型リーフの模型実験

(1) 実験装置および実験方法

図-4に実験に用いた平面水槽とデルタ型リーフの設置状況を示す。平面水槽はフラッター型造波装置を有する長さ30m、幅15m、深さ0.6mのコンクリート製である。リーフ模型は縮尺1/30で、底辺が現地サイズで90mのものを想定している。水槽の片側に勾配1/30の一様勾配斜面を作成し、その上にリーフ模型を設置した。リーフの沖側ののり面勾配は1/10で、頂角は等深線が常に 60° となるように設計された。一様勾配斜面は砕石上に亜鉛メッキ鋼板を敷いたもので、滑面となっている。またリーフ模型は天端水深は0cm (reef 1) と5cm (reef 2) の2種類とし、周期は現地のうねり性波浪が5~10秒であることを考慮して実験周期を1.3秒とした。波形勾配を堀川・砂村 (1974) の海浜の安定条件から堆積型、中間型、侵食型の3種類 ($H_0/L_0 = 0.015, 0.025, 0.04$, ただし海底勾配1/30, 砂粒径0.3mmの場合) を選定した。また比較対照のために水槽に何も設置しない一様勾配海浜 (normal) についても実験を行った。水平床部での水深は normal で35cm, reef 1 で34.1cm, reef 2 で29.1cmである。測定項目は砕波点付近の波高変化, peel velocity, 流況, 波の打ち上げ高である。

波高は容量式波高計を汀線に直角方向に設けた測線

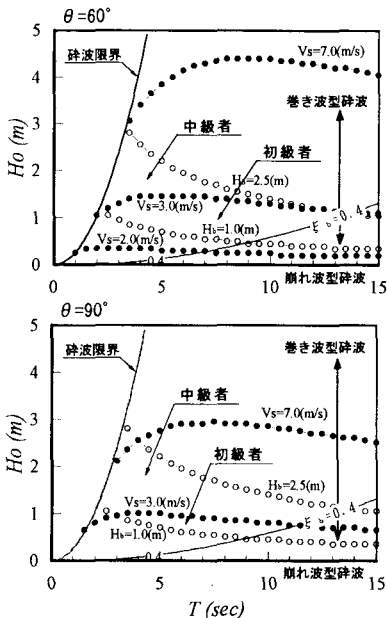


図-3 サーフィン能力別最適波浪条件

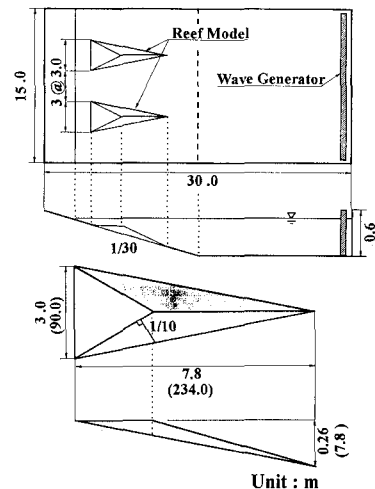


図-4 実験水槽とリーフ模型

(normalでは6本、reefでは13本)上を10 cm 間隔で24点移動させて砕波点前後の変化を測定した。

流況測定は、プラスチック製で穴あきの練習用ゴルフボールを50 cm メッシュ間隔、計170点の位置で投入し、その移動状況を校舎の屋上からビデオ撮影することにより行った。通常、サーファーは表層の離岸流に乗って沖に出るのでサーフィンに適する海浜流を知る上で表層部が重要である。練習用ゴルフボールは頂部が表面にわずかに出る状態で浮くため、表層での流れを知るために非常に適している。

peel velocity の測定も流況測定と同様に、リーフ上での砕波の模様をビデオ映像を解析して求めた。

波の打ち上げ高は、汀線に直角方向の測線にスチールテープを張り、50 波程度の波の打ち上げの水平距離の平均を求めてこれを高さに換算した。

(2) 実験結果

a. リーフ上での砕波特性

デルタ型リーフ周辺での波の砕波の特性を知ることは、サーフィンにとってのみならず、リーフ設計上においても重要な要素である。図-5は測線ごとに得た reef 周辺の砕波高の空間分布をリーフ位置と対比して示している。リーフ位置図の上を示す図は沖波波高で無次元化したもので、下方の図は各波形勾配ごとに normal の実験で得た砕波高の平均値で無次元化したものである。この図によれば、天端水深に関わらず、リーフ頂部付近とリーフ間では砕波高の増大が顕著であり、リーフの脇では砕波高はかえって減少している。この現象は、リーフ頂部ではリーフに到達した波が屈折作用により集中し、波のエネルギーが増大したためである。これとは逆にリーフの脇では屈折作用により到達するはずの波の一部が頂部で収束し、砕波するため、波高が減少すると考えられる。またこうしたエネルギーのアンバランスの結果、リーフ頂部からリーフの脇に沿って岸向きの流れが発生し、波と流れの干渉効果によっても波高が減少することも砕波高変化の原因の1つになる。リーフ間における砕波高の増大は、リーフ間において発生する沖向きの離岸流が砕波高の増大をもたらしていると考えられる。波形勾配の影響に着目すると、波形勾配が小さくなるほどリーフ周辺の砕波高の場所的な違いが小さくなる傾向が見られる。

b. peel velocity

peel velocity V_s は、斜め砕波における砕波点の移動速度で、サーフボードの平均的な移動速度とほぼ等しい。

図-6はビデオ解析による V_s と計算値との比の波形勾配による変化を示している。計算は斜面勾配 $\tan \beta = 1/10$ の一様な海岸に入射角 $\alpha_0 = 60^\circ$ で入射した場合を想定し、式(3)~(6)から計算した。なお α_0 は微小振幅波

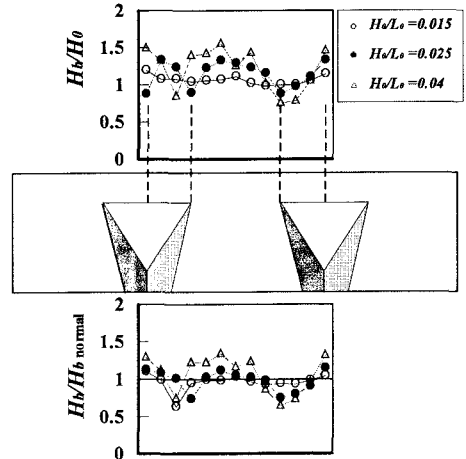


図-5 リーフ周辺の砕波高分布 (天端水深 5 cm)

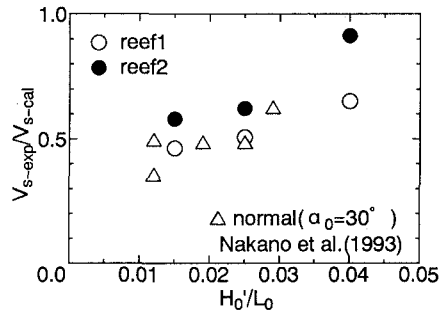


図-6 peel velocity

理論から $\sin^{-1}(\tanh kh_b \cdot \sin \alpha_0)$ として与えている。図には $1/10$ の一様勾配斜面に $\alpha_0 = 30^\circ$ で入射した場合の実験結果 (著者ら, 1993) も併示した。これより波形勾配が小さいところでは実測の V_s は計算の半分程度と遅く、波形勾配が大きくなると計算値に近くなる。この違いは砕波限界公式の適用性がリーフ上では低いことに加え、微小振幅波理論を用いた屈折角の評価にも問題があり、重要な検討課題と言える。

c. リーフ周辺の流況

リーフ周辺の底質移動を考える上で底層の海浜流を把握することが特に重要である。一方、サーフィンを楽しむという観点からは表層の流れを把握することが重要となる。ここではサーフィンに対する適性を中心に考え、表層流を対象にして調べている。図-7は波形勾配 0.025 の場合の一様勾配斜面上と reef 2 周辺の流況を比較したものである。これらの図からリーフの設置により離岸流がリーフ間の中央付近に固定され、流れも強くなることが確認される。この傾向は波形勾配が大きくなるとさらに強くなる。なお図中の実線は波高変化測定から得られた砕波線を示している。

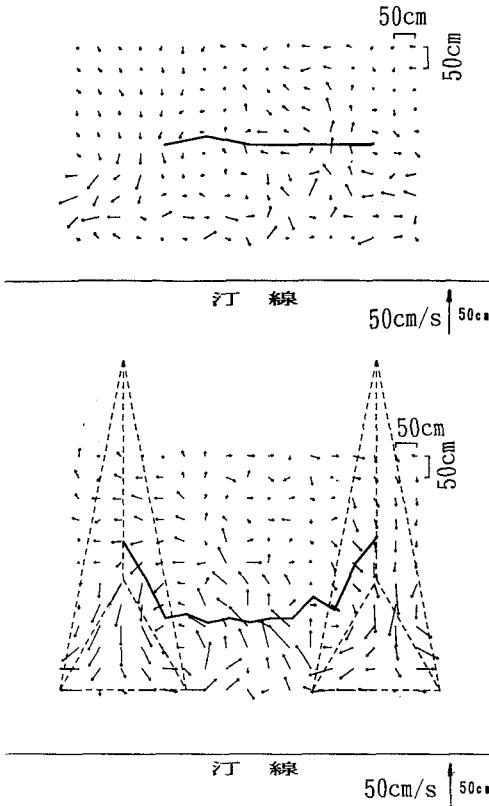


図-7 リーフ周辺の流況

d. 波の打ち上げ高

reef 2 (天端水深 5 cm) における波の打ち上げ高の場所的分布を図-8 に示す。これらの図の上側は相対打ち上げ高 R/H_0 を、また下側は一樣勾配海浜に対する打ち上げ高との比 R/R_r を示している。波形勾配が小さいケースを除き、リーフのない場合に比べ波の打ち上げ高は小さくなる傾向がある。特にリーフ間の打ち上げ高の減少は顕著であり、荒天時の防災機能を有す構造であることがわかる。

4. 緩勾配方程式に基づく波浪変形計算

デルタ型リーフ周辺の波浪変形を Berkoff (1972) の提案した緩勾配方程式と等価な

$$\frac{\partial P^*}{\partial t} - CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t} - CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\left(\frac{iW}{\omega} + \frac{C_g}{C} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P^*}{\partial x} + \frac{\partial Q^*}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

を基に、これを Madsen and Larsen (1987) の方法で計算した。ここに、 C は波速、 C_g は群速度、 k は波数、 P^* ,

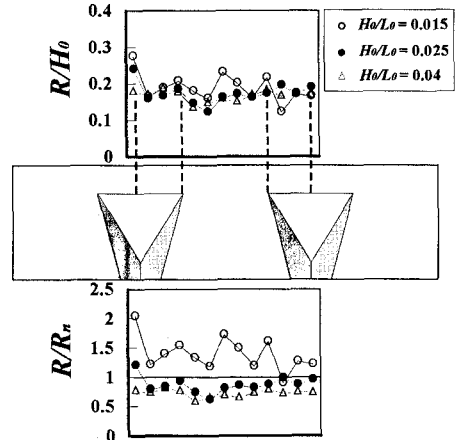


図-8 波の打ち上げ高

Q^* は複素線流量、 ζ は複素水位変動である。また、 $W = D/E$ 、 D : 波浪エネルギー逸散率、 E : 波浪エネルギーである。緩勾配方程式は海底勾配の変化が十分小さいことが前提となり、このリーフのようにリーフ上で波形が分裂するような領域では問題がある。しかし、本研究ではリーフの集波能力や波高分布特性を把握することが目的であり、そのためには十分である。実験でも明らかのようにリーフに沿った流れが発生し波流れ共存場となっているが、ここでは波のみの場として計算を進めた。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。砕波条件は孤立波について Yamada (1957) が導いた

$$(H/h)_b = 0.83 \quad \dots\dots\dots (10)$$

を用い、砕波によるエネルギー逸散率 D は岩垣ら (1981) の次式を用いた。

$$D = \frac{B}{4\gamma_b^3} \frac{\rho g H^2 \sqrt{gZ}}{L} \left(\frac{H}{Z} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 Z は全水深 ($= h + \bar{\zeta}$)、 $\gamma_b = H_b/h_b$ で、 B は定数である。

reef 2 で波形勾配 0.015 の場合のリーフ周辺の波高分布について計算と実験とを比較して図-9 に示す。数値計算結果はリーフの頂部およびリーフ間において波高が増大し、リーフの側面で波高が減少するという測定結果とよく一致している。

次にリーフ周辺の代表的な測線である測線-1 (頂部)、測線-7 (側面)、測線-11 (リーフ間) の岸沖方向の波高変化を実験と計算とで比較する (図-10)。測線-1 では計算波高がかなり大きい、現実にはリーフの先端部周辺では流れの影響が大きく、計算では考慮できていないためであると考えられる。また、砕波後の波高の減少は計算結果の方が緩やかである。これは、計算で砕波後

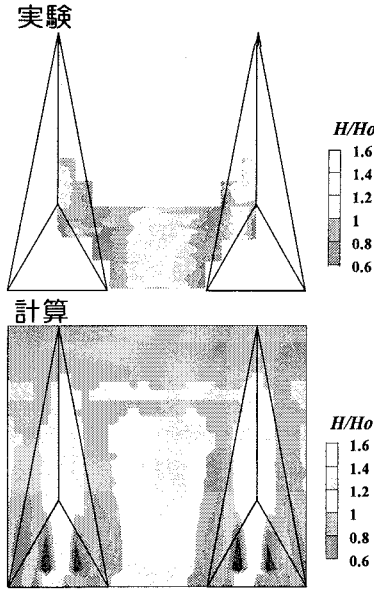


図-9 リーフ周辺の波高分布の比較

のエネルギーの流出や流れの影響の効果を考慮することができなかったためであると考えられる。これに対し、他の測線では比較的良好に一致している。

5. あとがき

静穏時はサーフィンに適する波を発生させ、荒天時には背後の海浜を守る海岸構造物として期待されるデルタ型リーフについて、模型実験と数値計算を通して検討した。広範囲の波浪条件でサーフィンが可能である頂角60度のリーフ模型周辺での碎波特性や流況、リーフ背後の打ち上げ高などを調べた。実験条件が限られているため、普遍的な特性の把握はできなかったが、サーフィン利用に有用な離岸流が促進されることや荒天時には打ち上げ高の軽減効果が期待できることなど定性的な特徴が明らかになった。今後はリーフ設置間隔や海浜変形に及ぼす影響などを検討していく予定である。

参考文献

岩垣雄一・間瀬 肇・田中 剛 (1981): 不規則波の浅水変形モデルについて, 第28回海岸工学講演論文集, pp. 104-108.
 合田良実 (1973): 不規則波の碎波指標について, 第20回海講論文集, pp. 571-577.

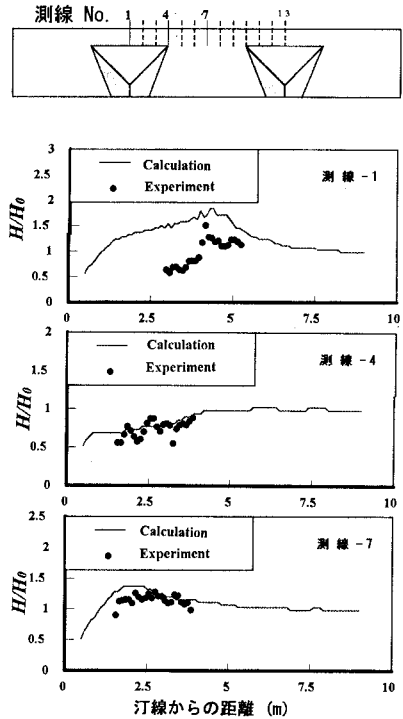


図-10 測線別の波高変化

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, 第9巻, pp. 229-234.
 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右 (1974): 波による2次元海浜変形に関する実験的研究, 第22回海岸工学講演論文集, pp. 193-199.
 吉田善昭 (1993): マリンリゾート共存型人工リーフによる波の変形とその防災機能, 徳島大学修士論文.
 Berkoff, J. C. W. (1972): Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 14th ICCE, pp. 471-490.
 Le Méhauté, B. and Koh, R. C. Y. (1967): On the breaking of wave arriving at an angle to the shore, J. Hydr. Res., Vol. 5, No. 1, pp. 541-549.
 Madsen, P. A. and Larsen, J. (1987): An efficient finite difference approach to the mild slope equation, Coastal Engineering. Vol. 11, pp. 329-351.
 Walker, J. R., Palmer, P. Q. and Kaukea, J. K. (1972): Recreational surfing on Hawaiian reefs, Proc. 14th. ICCE, pp. 2609-2628.
 Yamada, H. (1957): On the highest solitary wave, Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., Vol. 5, pp. 53-67.