

天端面に傾斜を設けた人工リーフの水力機能に関する基礎的研究

Experimental Study on Hydraulic Characters of Artificial Reef with Inclined Crown

村上啓介¹・真木大介²・的場勇喜³

Keisuke MURAKAMI, Daisuke MAKI and Yuki MATOBA

A shore protection facility harmonized with habitats and recreation has been desired to reproduce favorable coastal environments. An artificial reef is one of the possible facilities that provide favorable coastal environments concurrently with protecting degraded beaches. This study evaluates some hydraulic characteristics of the artificial reef that has a multi-purpose for protecting shores as well as providing spots for surfing recreation. The artificial reef has an inclined crown, and its characteristics such as wave amplification on the reef, wave breaking type, wave energy transmission and high-order wave generation were investigated through two-dimensional hydraulic experiment.

1. はじめに

土砂の移動形態や海岸侵食の度合いに応じた保全対策が砂浜の後退が進む海岸では必要となる。海と陸の境界に位置する海岸は、豊かな自然環境が形成される場であるとともに様々な社会活動がおこなわれる場でもある。そのため、海岸保全対策では海浜防護に加えて海岸環境や海岸利用への配慮が重要となる。

海岸保全対策に用いられる工法は、海岸侵食の程度、海浜変形特性、経済性、景観、海面の利用状況などに応じて選択される（海岸保全施設技術研究会，2004）。対策工法は様々であるが、海面下に没した人工リーフは景観や周辺環境への影響が少なく水産資源との協調も期待されることから、海岸環境と調和した海岸保全施設としての可能性が期待できる（例えば、谷野ら，1997）。また、サーフィン利用を目的とした人工リーフの施工事例にも見られるように、海岸利用との調和の可能性も期待できる（例えば、Borrero et al., 2003）。

リーフ地形とサーフィンに適した波に関する研究の端緒はWaker J. R. et al. (1974)に見ることができ、砕波時の peel angle と peel velocity がサーフィンでは重要なパラメータになることを指摘している。国内では吉田ら (1991) や中野ら (1994) がデルタ型人工リーフを提案し、サーフィン利用への適用性と海岸保全効果を評価している。その中で、天端面が傾斜したデルタ型人工リーフはサーフィンに適した砕波の獲得に有利な形状であると報告しているが、その検討は限られた波浪条件に留まっている。

海岸に來襲する波浪は様々であり、多目的人工リーフ

の有用性を示すためには幅広い波浪条件に対してサーフィン利用機能と波浪減殺機能を評価する必要がある。本研究では、天端面に傾斜を設けた人工リーフ上を通過する波の変形特性と波浪制御機能についての検討を通じて多目的人工リーフの可能性を評価する。

2. 水理模型実験の概要

反射吸収式の2次元造波水路（長さ15m、高さ0.6m、幅0.4m）を用い、模型縮尺1/30を想定して水理実験をおこなった。実験で用いた人工リーフ断面を図-1に示す。Case-AとCase-Bはサーフィンに適した砕波を期待する目的でリーフ天端面に1/10勾配の傾斜を設けている。また、Case-Cは比較として一般的な人工リーフ断面を想定したものである。Case-AとCase-Cのリーフ断面積は等しく、Case-Bのリーフ長はCase-Aの2倍である。

造波水路内に勾配1/20の不透過傾斜面を設け、その上に図-1に示す人工リーフ模型を設置した。水路内の沖水深は $h_0=40\text{cm}$ と 43cm の2ケースで、人工リーフの岸端部の天端水深（以下、最小天端水深と呼ぶ）が $h_c=2\text{cm}$ 、および 5cm となる位置にリーフ模型を設置した。

本研究では、リーフ上を通過する個々波の砕波波高、砕波形式、および砕波位置を把握する目的で規則波を造

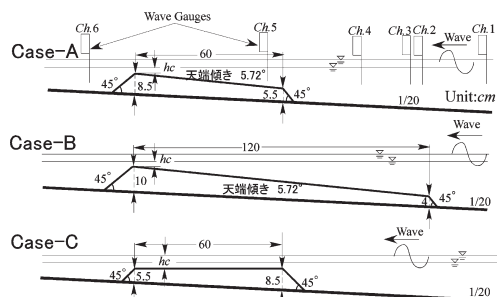


図-1 人工リーフ模型の諸元

1 正会員 博(工学) 宮崎大学工学部准教授
2 正会員 工修 宮崎大学工学部
3 学生員 (株)霧島酒造

波して実験をおこなった。入射波周期を1秒から2.4秒まで0.2秒刻みで変え、各周期について入射波高を4cmから9cmまで概ね1cm刻みで変えて実験をおこなった。

実験では、容量式波高計を用いて入射波高、反射波高、通過波高、碎波波高、および堤前波高を計測した。反射率は分離推定法を用いて求めた。また、リーフ上を通過する波を水路側面からデジタルビデオカメラで撮影し、画像から碎波位置と碎波形式を読み取った。

3. 人工リーフ上での波高増幅と碎波形式

人工リーフ天端上でサーフィンに適した碎波を得るためには、来襲波がリーフ天端で効率的に増幅される必要がある。図-2は人工リーフによる波高増幅率を示したものである。波高増幅率は碎波波高 H_b と入射波高 H_0 の比で定義した。合田(1970)は一様勾配斜面における沖波緒元と碎波波高の関係を示しており、その指標を1/10勾配と1/20勾配の場合について併せて記している。

人工リーフ天端の傾斜の有無によらず、波高増幅率は沖波波形勾配 L_0/H_0 の減少とともに増大する傾向にある。また、Case-AやCase-Bの増幅率はCase-Cに比べて総じて大きく、天端面の傾斜が増幅効果を高めていることが確認できる。特に、入射波の波形勾配が小さい場合ほど増幅率の差が顕著になる。また、図-2 (a) と (b) より、天端面が傾斜した人工リーフの碎波波高については、若干の過大評価ではあるが合田の碎波指標で概ね説明でき

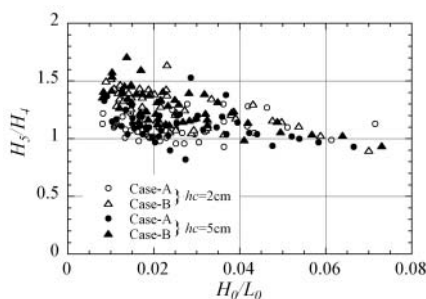


図-3 人工リーフ天端傾斜部における波高増幅効果

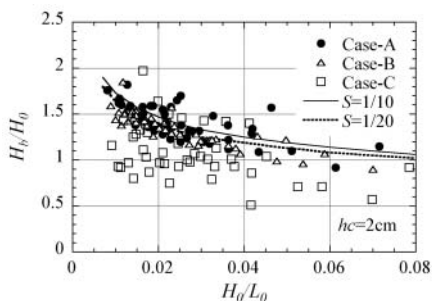
る。なお、リーフ長が短いCase-Aの増幅率がCase-Bより僅かに大きい値を示す傾向が見られるが、これはCase-Aのリーフ設置水深がCase-Bより浅いためと考えられる。

人工リーフ天端の傾斜部における波高増幅効果を図-3示す。図の縦軸は人工リーフ堤前波高 H_4 と碎波波高 H_5 の比を示している。図-2と同様に、波高増幅率は入射波の波形勾配の減少とともに増大する傾向にある。さらに、リーフ斜面部が長いCase-BはCase-Aに比べて高い波高増幅率を示しており、リーフ斜面部が長いほど波高増幅に対して有利であることが伺える。

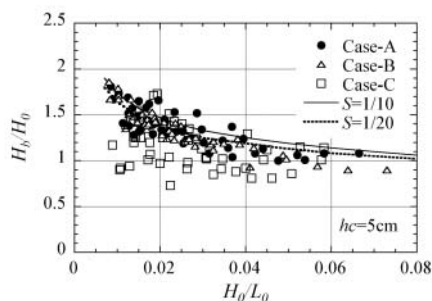
人工リーフ上での碎波形式はサーフィン利用の適否に強く影響する(例えば、Shaw Mead, 2003)。進行波の碎波形式はSurf Similarity Parameterで分類されることが知られている(Battjes, 1974)。図-4はリーフ上で生じた碎波形式をビデオ画像から判別し、Surf Similarity Parameter ($\xi = \tan\beta / (H_0/L_0)^{1/2}$)により整理した結果を示したものである。本研究では、人工リーフの設置で海底勾配が局所的に不連続になることから、パラメータに含まれる勾配項はリーフ沖側の法先端とリーフ天端の岸側端を結んだ直線の勾配で仮想的に定義した。

Battjes (1974)によれば、サーフィンに適したPlunging型碎波が生じる条件は $0.5 < \xi < 3.3$ となり、本実験では入射波条件の全てがこの範囲に含まれる。最小天端水深が浅い図-4 (a) では、天端面に傾斜を設けたCase-AとCase-Bの両断面ともにサーフィンに適したPlunging型、およびPlunging型とCollapsing型の間接的な碎波形式が確認された。一方、天端面が水平なCase-Cでは、全ての入射波条件において写真-1に示すリーフ沖側端でBackwashを伴うサーフィンに適さない碎波形式が発生した。天端面が水平な人工リーフは一様な海底面上に極端な勾配変化をもたらすため、碎波形式はSurf Similarity Parameterによって明確には分類されず、天端水深によってはリーフ沖側端でBackwashを伴う特異な碎波形式を呈する。

最小天端水深が深い図-4 (b) においても、天端面に傾斜を設けたCase-AおよびCase-Bではサーフィンに適したPlunging型碎波が幅広い入射波条件において確認された。



(a) $hc=2\text{cm}$



(b) $hc=5\text{cm}$

図-2 沖波波形勾配に対する波高増幅率の比較

限られたリーフ断面についての実験結果ではあるが、天端面の傾斜はサーフィン利用に適した砕波形式の獲得にとって極めて重要であるとともに、そこでの砕波形式は Surf Similarity Parameter に従うと考えられる。

人工リーフ上での砕波水深を合田の砕波指標と比較し

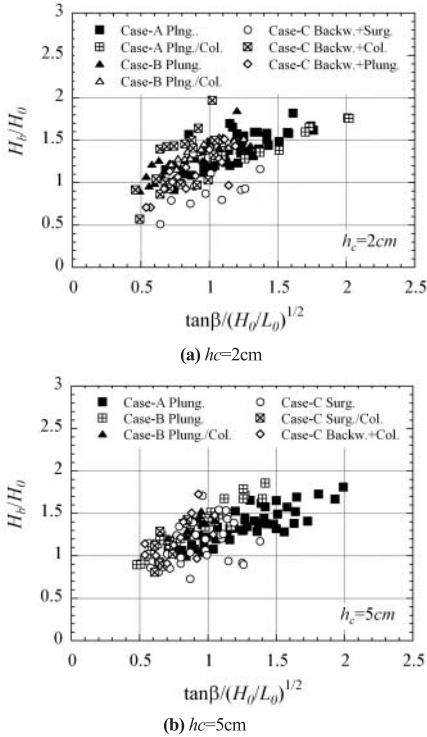


図-4 リーフ天端上での砕波形式

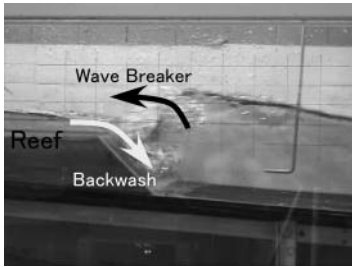


写真-1 Case-Cの砕波形式の一例 ($T=1.4s$, $H_0=9cm$)

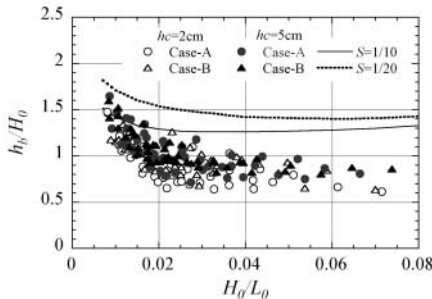


図-5 リーフ天端上での砕波水深

た結果を図-5に示す。図-2の波高増幅率の特性で示したように、天端面が傾斜した人工リーフ上での砕波波高は合田の砕波指標で概ね説明することができたが、入射波高に対する砕波水深比 (h_b/H_0) に関しては、波形勾配が小さい場合を除いて相違が見られる。Battjes (1974) は、砕波点での波高水深比 H_b/h_b は砕波形式に応じて $0.7 \sim 1.2$ 程度の範囲で変動すると述べている。リーフ天端上での波高増幅を考慮すると、Case-AとCase-Bの波高水深比は波形勾配が小さい場合を除き上記指標の上限値と概ね一致している。一方、Case-Cではリーフ沖端部で強制砕波が生じるため若干小さい値を示している。

砕波の発生位置は最小天端水深と入射波高の比に応じてリーフ斜面上の範囲で変動した。デルタ型人工リーフに見られるように、サーフィン利用を目的とした人工リーフが3次元的な構造形式であることを考えると、リーフ上での砕波はサーフィンに適した peel angle の発生を期待させるものである。

4. 天端面が傾斜した人工リーフ上の波浪制御機能と高周波成分の励起

(1) 人工リーフ上の波浪制御機能

サーフィンへの適用性とともな十分な波浪制御機能が多目的人工リーフには要求される。図-6は最小天端水深が $h_c=5cm$ の場合のエネルギー伝達率を示したものである。ここで、エネルギー伝達率 $(F_t/F_i)^{1/2}$ は、入射波の周波数の3倍周波数成分までのエネルギーフラックスの総和を入射波と通過波について算定し、その比の平方根で定

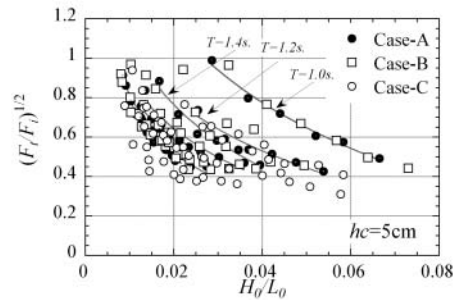


図-6 人工リーフのエネルギー伝達率 ($h_c=5cm$)

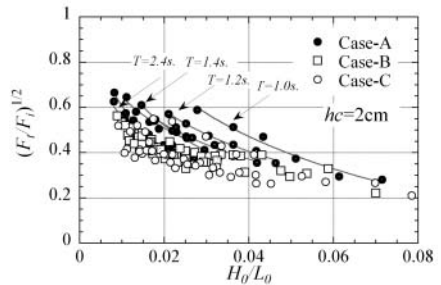


図-7 人工リーフのエネルギー伝達率 ($h_c=2cm$)

義した。

天端面に傾斜を設けたCase-Aのエネルギー伝達率は天端長が等しく天端面が水平としたCase-Cに比べて総じて高い値を示している。図中にはCase-Aの伝達率に対して入射波の周期ごとに回帰曲線を示している。各入射波周期についてみると、入射波周期が最も短い $T=1s$ ではCase-Aのエネルギー伝達率はCase-Cに比して相当に高い値を示すが、入射波周期が長くなるに従いリーフ断面の違いによる伝達率の差は徐々に小さくなる。一方、天端長がCase-Aの2倍のCase-Bでは、最も周期が短い $T=1s$ の場合を除けば伝達率は概ねCase-Cと同等である。入射波の周期が短い場合は波高増幅とそれに伴う碎波の規模が相対的に小さいため、碎波による効率的なエネルギー減衰が得られなかったためと考えられる。

図-7は最小天端水深が $h_c=2cm$ におけるエネルギー伝達率を示している。Case-Cでは写真-1に示すようなリーフ沖端部でのBackwashを伴った激しい碎波が各入射波条件で発生しており、リーフ天端長が同じCase-Aに比べてエネルギー伝達率が相対的に低くなっている。一方、リーフ長がCase-Aの2倍であるCase-Bでは、Case-Cと同等の波浪制御効果が確認できる。天端面に傾斜を設けた人工リーフでは、天端長を長く取ること天端上での波高増幅機能と波浪制御機能が高くなり、多目的人工リーフとしての適用性が向上するものと考えられる。

人工リーフの波浪制御機能を評価する上でリーフ反射率も重要な要素となる(全国海岸協会, 2004)。図-8は最小天端水深が $h_c=2cm$ の場合の反射率を入射波周期に対して示したものである。各々の周期で反射率は入射波高に応じて変動したため、図中には最大値, 最小値, および平均値をプロットしている。入射波周期と波高によるばらつきはあるが、リーフ断面形状による反射率の違いは顕著ではない。最小天端水深が $h_c=5cm$ の場合においても同様の結果であった。リーフ断面形状による反射率の違いが小さいことより、図-6や図-7で示したエネルギー伝達率の相違は、主にはリーフ天端上での碎波によるエネルギー損失の相違によるものと推察される。

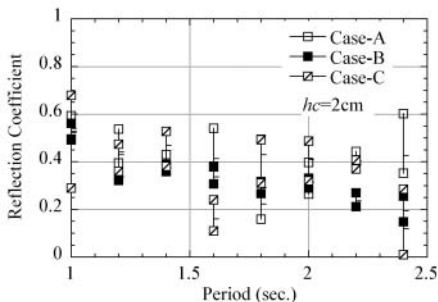


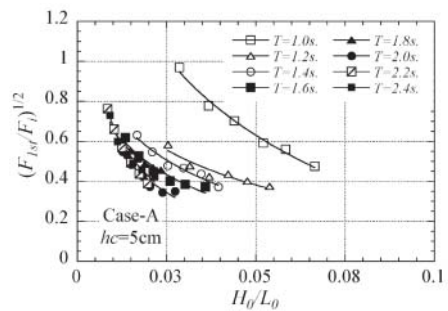
図-8 人工リーフの反射特性 ($h_c=2cm$)

(2) 人工リーフによる高周波成分の励起

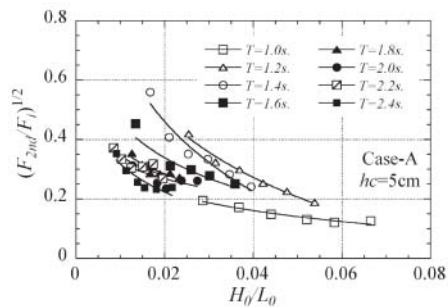
没水構造物と波の非線形干渉によって高次の周波数成分波が透過側に励起されることが知られている(例えば、櫛山, 1992; 吉田ら, 1996)。また、現地観測においてもリーフ透過波の周期が沖波よりも短くなる傾向が報告されている(例えば、大中ら, 1992)。

図-9はCase-Aの人工リーフ断面について、最小天端水深が $h_c=2cm$ の場合の透過波に含まれる基本周波数成分, 2倍周波数成分, および3倍周波数成分のエネルギーフラックスを入射波のエネルギーフラックスに対する比で示したものである。各周波数成分とも入射波の波形勾配の減少に従いエネルギーフラックス比は増大する傾向を示している。

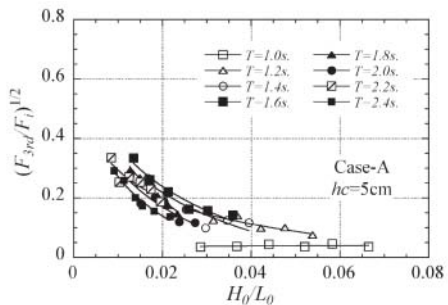
図-6と図-9(a)の比較より、人工リーフ背後に伝達される主要なエネルギーは基本周波数成分波であることが



(a) 基本周波数成分



(b) 2倍周波数成分



(c) 3倍周波数成分

図-9 各周波数成分波のエネルギーフラックス比

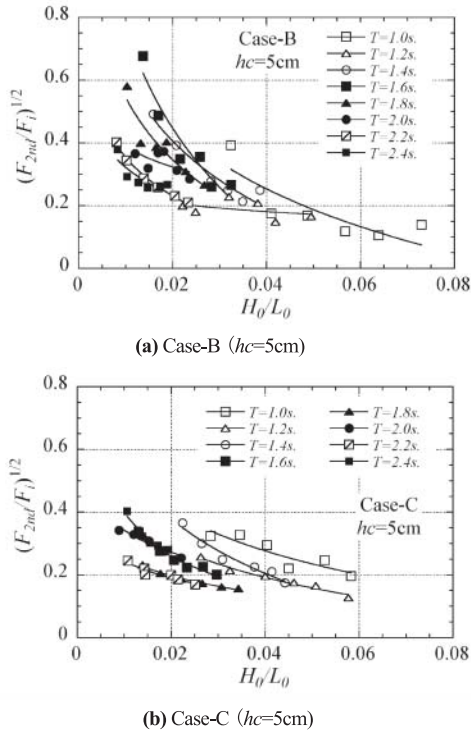


図-10 2倍周波数成分波のエネルギーフラックス比

確認できるが、碎波が発生している条件であっても高次成分波の発達は無視できない。なお、天端水深が $h_c=2\text{cm}$ ではリーフ天端上での碎波が強まり、高次成分波の発達は $h_c=5\text{cm}$ の場合に比べて減少する傾向を示した。

図-10はCase-BとCase-Cの人工リーフ断面において、最小天端高さが $h_c=5\text{cm}$ の場合の透過波に含まれる2倍周波数成分波のエネルギーフラックス比を示したものである。大中ら(1992)は透過波の周期変化に対する天端幅の影響を検討し、天端幅の相異が透過波の周期変化の特性に与える影響は小さいことを示している。Case-Bの天端幅はCase-Aの2倍であるが、図-10(a)と図-9(b)より2倍周波数成分の発達特性には大きな差異は見られない。

図-10に示すCase-CとCase-B、および図-9(b)に示すCase-Aについて比較すると、天端面が傾斜した人工リーフにおける2倍周波数成分の発達の程度はCase-Cに比べて大きい。これは、最小天端水深が小さい $h_c=2\text{cm}$ の場合についても同様であった。天端面が傾斜した人工リーフでは、斜面上での波高増幅によって高次成分波が発達した後に碎波が生じるのに対して、Case-Cでは入射波がリーフ沖端部で強制碎波するため高次周波数成分波の発達が抑制された結果と考えられる。

5. まとめ

人工リーフの天端面の傾斜は、波高増幅効果とともに

サーフィン利用に適した碎波形式の獲得にとって極めて重要である。リーフ斜面長が長いほど天端上での波高増幅率は高くなる。入射波が天端斜面上で碎波する場合の碎波波高は合田の碎波指標で概ね算定することができる。また、リーフ天端上で碎波形式に関しても Surf Similarity Parameterに概ね従う結果が得られた。一方、入射波高に対する碎波水深比は合田の碎波指標とは必ずしも一致しない結果となった。

天端面に傾斜を設けた人工リーフでは、天端長を長く取ることによって天端上での波高増幅機能と波浪制御機能が高くなり、多目的人工リーフとしての適用性が向上するものと考えられる。天端面が傾斜した人工リーフでは、斜面上での波高増幅によって高次成分波が発達した後に碎波が生じる。そのため、リーフ沖端部で強制碎波が生じる天端面が水平な人工リーフに比べて高次成分波が発達しやすい傾向にある。

人工リーフの水利機能を検討する際に、リーフ背後のセットアップの影響は重要な要素となる。海面利用に配慮した多目的人工リーフ周辺の海浜流場、およびセットアップの碎波変形への影響について検討を進める予定である。

参考文献

- 大中 晋, 吉沢史明(1992): 人工リーフの天端幅の違いによる波浪低減効果および反射率について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 641-645.
- 海岸保全施設技術研究会編(2004): 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp. 3-155.
- 合田良実(1970): 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39-49.
- 榊山 勉(1992): 潜堤による非線形波の分裂に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 626-930.
- 全国海岸協会(2004): 人工リーフの設計の手引き, pp. 1-95.
- 谷野賢二・綿貫 啓・山本泰司・明田定満・廣瀬紀一(1997): 高天端潜堤の水利特性と生物相, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1141-1145.
- 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人工リーフ周辺の波浪特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 721-725.
- 吉田明德・村上啓介・山城 賢(1996): 多成分不規則波と没水構造物の非線形干渉解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 791-795.
- 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.
- Battjes J. A.(1974): Surf Similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 466-480.
- Borrero J. C. and C. Nelsen (2003): Results of comprehensive monitoring program at Pratte's Reef, Proc. 3rd International Surfing Reef Symposium, pp. 83-98.
- Shaw Mead (2003): Surfing science, Proc. 3rd International Surfing Reef Symposium, pp. 1-36.
- Walker J. R., R. Q. Palmer and J.K. Kukea (1972): Recreational surfing on Hawaiian reef, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., pp. 2609-2628.