

波別解析法のサーフィンへの応用について

西 隆一郎・佐藤 道郎・Nicholas, C. Kraus*

(受理 平成7年5月31日)

Application of the Wave-by-wave Algorithm to a Surfability

Ryuichiro NISHI, Michio SATO and Nicholas C. KRAUS

The probability of random breaking waves in a surf zone has been examined using a set of prototype scale data and a wave-by-wave algorithm. It is verified that the current method can reasonably predict the probability of breaking waves apart from a trough region. Then, the wave-by-wave algorithm based on the Monte-Carlo method has been applied to an estimation of surfability. Regarding further study, it is noted that current approaches are applicable to other general topics related to coastal engineering, such as longshore current distribution, cross-shore sediment transport, longshore sediment transport and the definition of a surf zone.

1. まえがき

海岸工学ではこれまでに沿岸域の保全・利用を行う上で海岸構造物を設置したり、養浜を行い人口海浜を造成したりしてきた。これら、治水・利水・防災に関連した要求に加えて、これから先、沿岸域を一般に開放するうえで親水性に関連した要望が高まってくるものと考えられる。そこで、ここではこれまでに提案されてきた波別解析法に基づいた碎波モデルの応用として、サーフィンを対象に、サーフィンのし易さ・可能性について検討を加えることにした。これは、単なる不規則波の碎波モデルの応用というよりも、サーフィンが碎波波高、碎波形状、碎波速度、碎波の持続距離等の変量を必要とするために、碎波モデルの最適な検証対象とも言えるのに加えて、モデル自体の改良も行える可能性が高いと思われたためである。また、平成元年度の全国海岸域保全利用計画調査報告書によれば、実際海岸を利用する人にアンケートを取ると、利用率としては海水浴、釣り、散策が最も多く、そしてその他のサーフィン、ウィンドサーフィン、ヨット、ダイビング等の海洋レジャーが続いている。海岸の利用者全体に対するサーファーの絶対数としてはまだ多くな

いが、少なくとも若者をその地域に引きつける要因とはなりうるであろう。また、米国においてサーファーは海岸工事に対する一種の圧力団体ともなっており、サーフィンを工学的に理解しておく必要もあると思われた。加えて、サーフボードのかわりに、洪水時の流木・漂流物をイメージすれば、これらの漂流物が碎波帯内で海岸構造物にどのような波力を及ぼすか等についても、ここで用いたモデルを今後改良すれば、検討が可能になるのではないかと考えた。

これまでサーフィンについては、中野等(1994)によりデルタ型リーフを用いた実験的研究や、Walker et al. (1972)による碎波特性とサーフィンの難易度の関係についての考察に加えて、Dally(1990)によるサーフィンへの統計波の応用等の研究が報告されている。サーフィンにおいては、当然不規則波の碎波について検討する必要があり、そのアプローチとしては、スペクトル解析法に基づくものと波別解析法に基づくものが考えられるが、本研究においてはできるだけ個々の入射波の特性を見ていくために波別解析法のアプローチを採用することにした。具体的には、波別解析法に基づいて任意地形上での不規則波の波浪変形と碎波を数値計算し、その結果を縮尺効果の入らないような大

* Texas A&M University-Corpus Christi

型造波水路データならびに現地観測データと比較し、不規則波の碎波モデルの有効性を示そうとした。数値碎波モデルの検証後、各入射波の碎波波高、碎波速度、碎波形状、そして碎波の持続距離を求め、その応用としてサーフィンのし易さ (Surfability) について検討した。

2. 不規則波の碎波モデル

ここでは、使いやすくしかもモデルの構成が複雑にならず波浪変形モデルとしての使用実績の高い Dally et al. (1984, 1985) のエネルギー消散に基づいた規則波の波浪変形式を、個々波に適用することにした。基礎式は、(1)式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(F \cdot \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(F \cdot \sin \theta) = \frac{\kappa}{d}(F - F_s) \quad (1)$$

ここで、

x = 汀線に直角方向の座標で沖向きに正

y = 沿岸方向の座標軸

F = 波のエネルギーフラックス

θ = 波の入射角

κ = 経験的な波の減衰定数

d = 全水深で静水深 h と平均水位 η の和

F_s = 安定波のエネルギーフラックス

また、波のエネルギーフラックスは

$$F = E \cdot C_g = E \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \cdot C \quad (2)$$

ここで、 E = 波のエネルギー = $\frac{1}{8} \rho g H^2$

C = 波の位相速度

k = 波数 = $2\pi/L$

C_g = 波の群速度

h = 局所波高

ρ = 水の密度

H = 局所波高

沿岸方向に地形が一様であると仮定すると(1)式は以

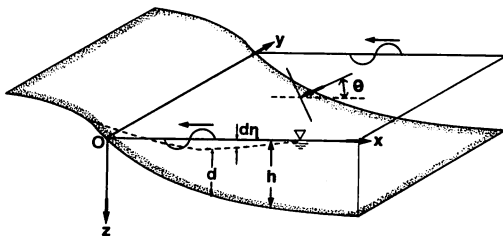


図-1 明るい座標系

下の用に簡略化される。

$$\frac{d}{dx}(F \cdot \cos \theta) = \frac{\kappa}{d}(F - F_s) \quad (3)$$

しかし、サーフィンのし易さを知るために現地の海岸を対象にモデルを適用する場合に、入射角の時系列が得られていることは少ない。また、キャリブレーション用に用いた大型造波水路実験においても、入射角は直角入射となっているので、本論文中では θ を直角とした(4)式を、海浜に入射する個々の波に適用する波別解析法を用いることにした。

$$\frac{dF}{dx} = \frac{\kappa}{d}(F - F_s) \quad (4)$$

ここで、安定波のエネルギーフラックスについては、碎波が進行していくうちに、これより進行波のエネルギーフラックスが小さくなると波の再生が始まるわけであり、安定波のエネルギーフラックスは次式で、表される。

$$F_s = E_s C_g \quad (5)$$

ここで、 E_s は安定波のエネルギー密度でありこのエネルギーは、局所水深の関数である安定波波高 $H_s = \Gamma d$ により表される。ここで、 H_s は安定波の波高、 Γ は経験的な安定波定数、 d は全水深である。以上のことより、ここで用いるモデルには2つの経験的定数 κ と Γ が含まれているが、その値はそれぞれ $\kappa = 0.16$ 、 $\Gamma = 0.40$ として Dally et al. (1984, 1985) は勧めている。

波の基礎式を決めた後は、計算の沖側境界に入射する波浪条件をどのように決めるかが必要になってくる。ここでは実測の水位の時系列データが利用できる場合は、そのデータを zero down-cross 法で個々波に分解し、各波の波高と周期を求め、その各波高と周期を持つ規則波を、順にモデルの沖側境界より入射させた。ただし、このように入射波の時系列データが利用できることは少なく、普通は、ある代表的な波高とピーク周期しか利用できないことが多い。そこでこのような場合には、モンテカルロ法を用いて、(6)式に示すような波高のレーリー分布に従うように、個々波の波高を(7)式により求めた。

$$p(H)dH = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H}\right)^2\right]dH \quad (6)$$

$$H_p = H_{rms} \left[\ln\left(\frac{1}{1-p}\right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

ここで、 $p(H)$ ：波高の確率密度関数
 H_{rms} ：根自乗平均波高である。

3. 観測・実験データとの比較

上述したような手法を使って、各入射波の波浪変形を計算していくわけであるが、サーフィンにおいては碎波が海浜上のどこでどの程度生じるのかという碎波率を求めることが、最も重要と考えられる。そこで、碎波率に関して、これまでに得られた現地観測データ(DUCK' 85)を解析し、碎波率を求めた。また、大型造波水路においては、Southgate et al.(1994)により得られたビデオ画像に基づく碎波率の空間分布と比較することにした。

まず、図2にSouthgate et al.による大型水路内に設置された一様海浜斜面上での、不規則波の碎波率を黒丸で、本モデルによる計算値を実線で示した。数値計算においては、数値計算結果が入射される波数によりばらつかないように、1000波から200波程度の間で波数を変え計算を行ったが、ほぼ500波程度の入射

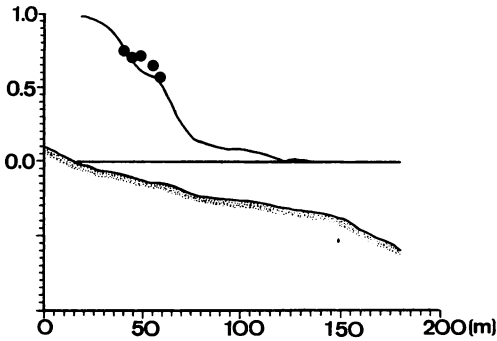


図-2 一様斜面上での碎波率（大型水路実験）

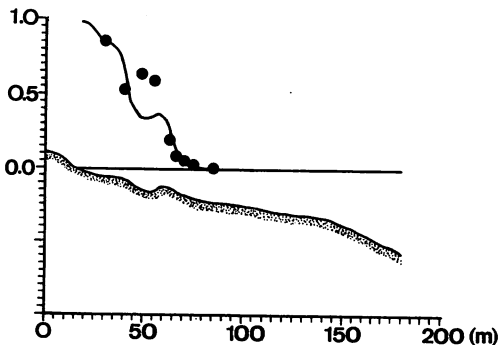


図-3 バー型斜面上での碎波率（大型水路実験）

波数で妥当な結果が得られたので、ここには500波入射させた場合のものを示してある。実験によるデータは、水深が1.5m程のところ、6割程度の入射波が碎波している。それから水深が徐々に浅くなるにつれて、碎波率が増加していることが分かる。数値計算では、沖側で入射した波はほぼ水深が3.0mの辺りまではどの波も碎波していないが、それ以降水深が浅くなるにつれてわずかながら碎波率が増加し、水深が2.3mの辺りから碎波率が急に増加している事が分かる。実験値と計算値の一致はかなり良いように思える。

次いで、図3に、大型水路内に設置されたバー型斜面上における碎波率の分布を黒丸で計算値を実線で示してある。実験値では、バーの沖側斜面上で、碎波率が徐々に増加し、バーの頂部を越えトラフ部においてピークを示している。碎波率が水深が深くなったトラフ部内においてピークを取ることは、物理的にどのような説明が行えるか明かでないが、ピークに達した碎波率は、一端減少し水深が浅くなるにつれて再び増加している。実線で示す計算値は、バーの頂部以前においては、データと良い一致を見るが、計算では水深が一端深くなると、水深が深くなることにより碎波が止み再生し始める波がでてくるので、ピークをバー頂部で持ち、トラフ部では碎波率が一端減少し、水深が浅くなると再び碎波率が上昇する。トラフ部を除いては汀線付近においてもモデルと実験データとの一致は良いと言える。

次いで、図4に現地において得られた波浪データを解析して求めた碎波率のデータを黒丸で、計算値を破線で示す。この現地データに関しては、バーの沖側海浜斜面上とトラフを越えてから汀線に渡る区間におい

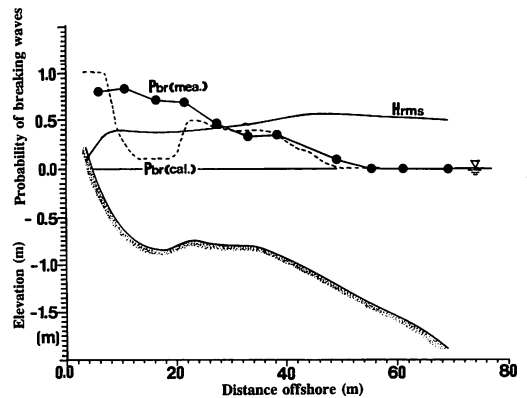


図-4 バー型斜面上での碎波率（現地海浜）

ては、実測値と計算値との一致は良いが、トラフ部においては計算値と実測値の一致が良好とはいえない。これはモデルでは、碎波限界が水深に依存したものである。水深が深くなるとそれ以上碎波する波がなくなるためである。トラフ部内においても碎波が増加するというを説明するには、depth limited以外の碎波基準を用い、加えて、Horizontal roller等の効果をモデルに取り込む必要があるかもしれない。

4. Surfability に関する数値実験

前章で示した結果から、ここで用いる波別解析法がサーフィンにとり重要な碎波率をトラフ部以外の領域においてはかなり良く予測できることが分かったので本モデルを用いて、合理的な Surfability の予測ができるものと思われた。そこでここでは、サーフィンにおいて重要な個々の波の碎波波高、碎波形状、碎波速度について、それぞれ数値計算に基づき考察することにした。また、サーフィンをどれだけ楽しめるか知るためには、碎波の持続距離を知ることも必要なので、一様海浜斜面上における値とパー型海浜斜面上における持続距離の値を、それぞれ計算により求めてみた。加えて、季節風や低気圧通過時にサーフィンに適した波が来襲することはよく知られているので、ここでは91年の19号台風時の有義波条件に基づいて、現地の地形を用いながら、碎波波高と波速 (peel velocity) に基づいて、surfabilityの検討をすることにした。

計算では、碎波モデルにインプットする波浪条件を決めるのに、まずは DUCK '85で得られた波高・周

期を個々波条件として、それぞれの波浪変形を計算し、その計算途中でそれぞれの波の碎波波高、波速、碎波相似パラメータに基づいた碎波タイプ、碎波の持続距離をチェックした。このように波高、波速、碎波タイプが分かるとそれぞれの入射波がサーファーにとって初級者用の波なのか、中級者向けの波なのか、あるいは上級者向きなのかを判定できる。その判定は、例えば Walker et al. (1992) による以下の判定基準を用いることにより行える。例えば碎波点での屈折角が 60° では、以下の様な関係がある。

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、サーフィンに最適なチューブに代表されるような巻波型の碎波形状に対しては、碎波点での碎波相似パラメータ (Battjes, 1974) が、 $0.4 < \xi_0 < 2.0$ になるかどうかを各入射波に対し調べればよい。図5にはここで用いた波別解析法による入射波浪の波高分布を示してある。縦軸が波高で、横軸がそれぞれ個々の波の入射順番と岸一沖方向の距離になっている。この図に示すのは DUCK '85により得られた波浪条件を現地のパー型断面に適用してある。図より入射波高・周期に応じて沿岸砂洲の沖側斜面の異なる地点で波が碎波し、それ以降碎けながら進行し、そして多くの波がトラフ部で再生を始め、水深が浅くなった汀線付近でほぼ一様に碎けていることが分かる。

さて、図6にそれぞれの波が碎波した地点での碎波波高を示す。前の図と同様に縦軸が碎波波高、横軸が

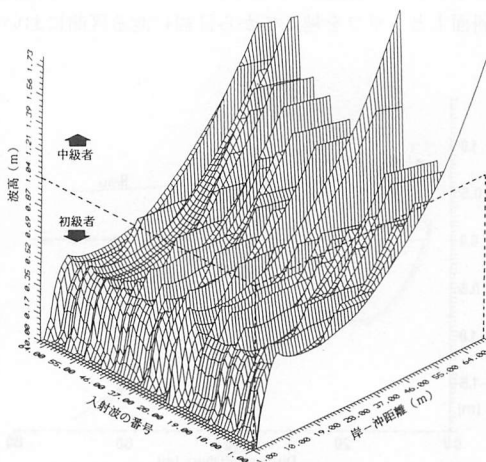


図-5 個々の波の波浪変形の様子 (数値計算)

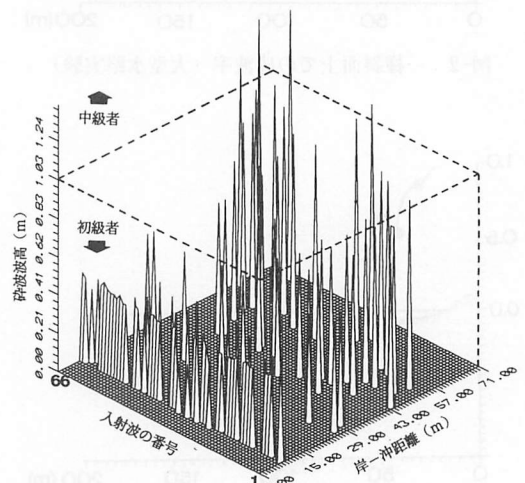


図-6 個々の波の碎波波高の分布

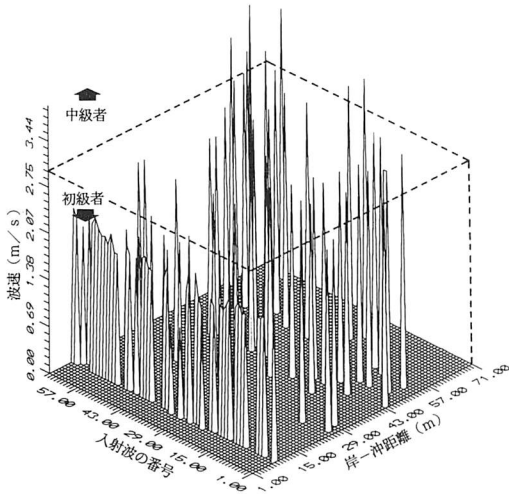


図-7 個々波の砕波波速の分布

それぞれ入射波の番号と、岸-沖方向距離である。ここでは、波モデルが多段砕波を計算できるために、一つの波について、バー近傍と汀線近傍で2つ以上の砕波波高をもつものがあることが分かる。多段砕波を考慮した汀線近傍での砕波波高は小さく初心者向けの波となっている。また、波線で囲った平面が初級者用と中級者用の境界面であり、この図に示す波は、ほとんどが初級者用の波となっており、中級者用の波が少ないことが分かる。

次いで、図7に砕波した波の波速をそれぞれの入射波に対して示す。実際、サーフィンを行う時には、波速 (peel velocity) も波高とともに重要であるが、ここで入射している波は波速から見てもほとんどが初級者用の波であることが分かる。

・ 砕波持続距離

サーフィンを空間的にも時間的にもどれだけ楽しめるか知る指標として、砕波の持続距離が必要である。つまり、砕波が持続する間は波に乗ることが可能と仮定する。砕波の持続距離は、砕波帯の幅とも密接に係わっているが、写真1に示すような多段砕波の場合には、最初の砕波点から波が再生を始める地点までの距離として、single breaking の場合には、砕波点から汀線までの距離で砕波の持続距離 (1_b) を定義した。例えば、この距離を波速で割れば、平均的なサーフィンを楽しむ時間が逆算できることとなる。まず図8に、1/50と1/30の一樣勾配斜面を対象として、それぞれ波高と周期の異なる1800波程度の波を入射させて、それ



写真-1 サーファーと砕波

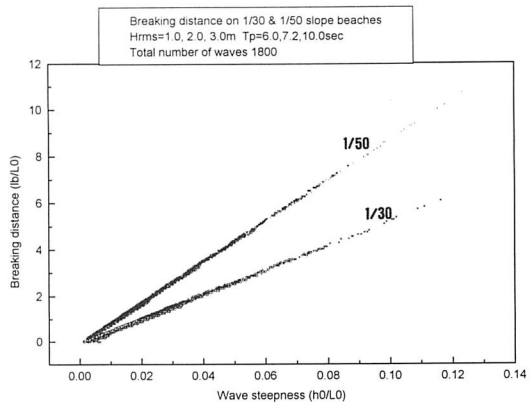


図-8 一樣海浜斜面上での砕波持続距離の分布

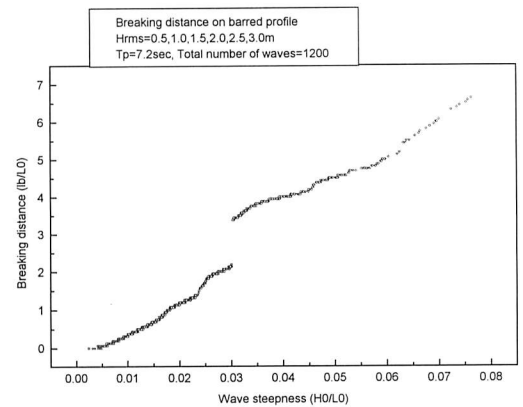


図-9 バー型斜面上での砕波持続距離の分布

ぞれの波の砕波の持続距離をプロットしてみた。明らかに、斜面勾配が緩やかなほど、同じ波形勾配の波に対しても、無次元砕波持続距離 ($1_b/L_0$) が長いこと

が分かる。次いで、バー型斜面を用いて、碎波の持続距離を図9に示した。この図では、波形勾配が0.03辺りのところを中心に、その前後で傾向が異なっている。これは用いた断面のバー頂部の前後の地形に対応したものである。また、明らかにバーの沖側に碎波した波の方が波高も大きく碎波距離も長いので、上・中級者はバーの沖側に、初級者はトラフより岸側で波を待った方がより安全に確実に能力に適した波をつかまえることかできよう。

4. 2 現地海岸における surfability

ある海岸を対象として年間を通しての surfability を厳密に考慮するためには、海浜地形の時系列データ、潮位、波高、周期、波向き等の時系列データが必要であるが、およそこれらのデータが利用できることはほとんどないと言ってよい。通常はよくても、夏季と冬季の海浜断面データと代表波高と周期のデータぐらいが利用できる。波向きにいたってはほとんど利用できない場合が多い。

また、季節風や低気圧の通過時にサーフィンに適した波が来襲することは良く知られており、ここでは1991年の19号台風前後の波浪データを、現地断面に入射させて surfability について考察した。ただし、海浜断面においては、波が長時間作用している間に地形変化が起きるわけであるが、高波浪作用中の実測断面を得ることは不可能なので、計算中同一断面を用いた。代表波高・周期については各2時間毎の有義波高を用いて規則波として計算を行った。長期間の surfability を求めるのに1/3最大波、1/10最大波のどちらを用いるかについては議論の分れるところであるが、サーフィンを実際に行うことを考えると、平均波高より大

きい代表波高を用いることは少なくとも妥当と言える。さて図10に、ほぼ4日間に渡る有義波高を用いて、波高と波速に基づく surfability の図を示す。対象とした期間では、波高によると50時間から70時間の間は上級者用で、それ以外の時間が中級者用の海象になっていると考えられるが、実際ここでは1/3最大波の条件を用いて判定を行っているので中級者用とした時間帯でも上級者用の大きい波がかなり入ってくるために、安全面からみると、少し避けたほうが賢明と思われる。

5. 結 論

ここで示した波別解析法に基づいた碎波モデルのアプローチが、実スケールでの碎波率を予測できることが分かった。碎波帯の範囲あるいは広い意味での碎波点の定義等の問題には、ここで示したような碎波率に基づく定義が必要と考えられる。また数値モデルから計算される碎波速度、碎波波高を用いて surfability の検討が行えることが分かった。次いで、碎波持続距離においても、碎波点から波が再生を始める地点までの距離として定義し、サーフィンをどれだけ楽しめるかを知るうえでのパラメーターとして示すことができた。また、現地での低気圧通過時の波浪データに基づいて、surfability の検討が行えることを示した。

謝 辞：

現若築建設株式会社、北村泰幸氏には、データ解析にご協力いただき深甚の謝意を表します。

参考文献

- ・ Battjes, J. A., (1974) : Surf similarity, Proc. 14th ICCE, ASCE, pp. 466-480.
- ・ Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1984) : Modelling wave transformation in the surf zone, Miscellaneous paper, CERC-84-8, US Army Waterway Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 44 p.
- ・ Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1985) : A model for breaker decay on beaches, Proc. 19th ICCE, ASCE, pp. 82-98.
- ・ Dally, W. R. (1990) : Stochastic modeling of surfing climate, Proc. 22nd ICCE, ASCE, pp. 516-529.
- ・ Ebersole, B. A. and Hughes, S. A., (1987) :

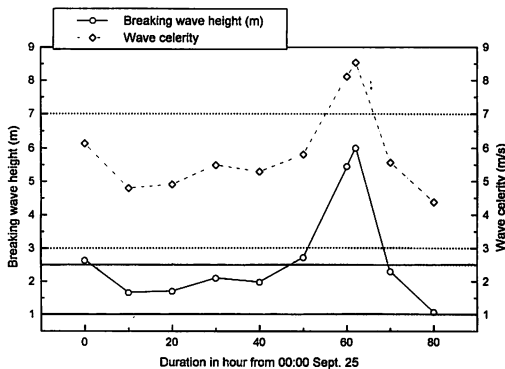


図-10 現地海岸における碎波波高と碎波波速の時系列(数値計算)

- DUCK85 photopole experiment, Miscellaneous paper CERC-87-18.
- ・ Southgate, H. N. and Wallace, H. M., (1994) : Breaking wave persistence in parametric surf zone models. (To appear, Coastal dynamics '94).
 - ・ Walker, J. R., (1974) : Recreational surf parameters, Univ. of Hawaii, Look Lab. Rep. No.30.
 - ・ 中野 普, 三島豊秋, 中野孝二, 三井 宏(1994) : サーフィンに関するデルタ型リーフ周辺の波浪変形, 海岸工学論文集第41巻, pp.721-725.
 - ・ 平成元年度国土総合開発事業調整費全国海岸域保全利用計画調査報告書 (平成2年3月)