

# ハイブリッド波浪変形理論による任意断面地形上の不規則波の変化予測

間瀬 肇<sup>1</sup>・小沢勇介<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

本研究は、バー型およびステップ型海浜における不規則波浪の浅海変形の室内実験結果、および2カ所の現地波浪観測結果を用いて、ハイブリッド不規則波浪変形理論が任意断面地形上の不規則波浪変形を予測できるか検討するものである。室内実験結果に関しては、沖波波形勾配が大きい場合に特に、理論結果と実測結果は良く一致し、現地波浪データに関しては、理論の前提（断面2次元）と状況はかなり異なるにもかかわらず、砕波による期待エネルギー逸散率を低減させると計算結果と実測結果の一致はかなり良かった。このことより、ハイブリッド不規則波浪変形理論は、任意断面海底地形上の波浪の変形予測に役立つことが確かめられた。

**Key Words :** hybrid wave transformation model, field waves, random waves, shoaling and breaking, arbitrary bottom topography

## 1. はじめに

沿岸域の高度利用とそれに伴う沿岸域の保全・防護対策のために、海岸堤防、護岸、防波堤、突堤、離岸堤など様々な海岸・海洋構造物が建設されてきた。近年、自然環境の保全と創造という社会的要求が強まり、砂浜海岸においても海水浴をはじめとする各種レクリエーションの場、あるいは、天然の消波構造物としての役割が認識され、砂浜の保全や人工海浜の造成が積極的に行われている。各種構造物の合理的設計や海岸侵食対策に当たっては、浅海域での波浪の特性を十分に把握しておかなければならない。

実際の海の波は大小様々で不規則であり、複雑な様相を呈している。そのため、その取り扱いに当たっては、何らかの理想化、単純化、あるいは、簡略化が必要である。不規則波の諸変形および波の作用を取り扱う方法としては、1) 単一有義波法、2) 単一最高波法、3) 確率分布法、4) スペクトル法、5) 不規則波実験法が挙げられる<sup>1)</sup>。1)~3) は不規則な波形からゼロクロス法によって定義される個々波を利用するものであるから、波別解析法としてまとめられる。スペクトル法は、水位変動を周波数成分に分解して各成分波について解析し、その結果を加えあわせて全体の波の特性を推定するものである。不規則波の浅水・砕波変

形予測モデルにおける波別解析法およびスペクトル法については、文献2)を参照されたい。

沖から汀線にいたる不規則波の波高変化の計算方法は、これまで幾つか提案されている。これらの計算法の多くは、一様勾配の海底地形に対するものである。しかし、現実の海底地形は沿岸砂州が存在するようなバー型海浜、あるいは、ステップ型海浜など複合断面の海底地形の場合が多く、そのような海底地形での不規則波浪の砕波減衰過程の実測研究は少ないばかりでなく、理論モデルも少なく Battjes and Janssen<sup>3)</sup>、水口・松田<sup>4)</sup>、佐藤・小部<sup>5)</sup>、Thornton and Guza<sup>6)</sup>、間瀬・岩垣<sup>7)</sup>の研究が挙げられるくらいである。これらの理論モデルは、波別解析法に基づくものである。

間瀬・Kirby<sup>8)</sup>は確率モデルとスペクトルモデルを統合したハイブリッド型の不規則波浪変形理論を構築し、一様勾配海底地形上での単峰型不規則波の浅海変形をかなりの精度で予測できること、また、この理論を双峰型スペクトル波の浅海変形予測に適用して、有義波高・周期の変化、双峰型スペクトルの出現率が沖合いで大きく沿岸で小さい原因等、双峰型スペクトル波の変形特性をうまく説明できることを示した<sup>9)</sup>。このハイブリッド不規則波浪変形理論は、何も一様断面海底地形に限ったものではないの

で、任意の断面地形上の波浪変形予測にも適用可能であると思われる。

本研究は、バー型海浜およびステップ型海浜地形上の不規則波浪の浅海変形に関する水理模型実験を行い、その変形過程をハイブリッド不規則波浪変形理論により表現可能であるかを調べるとともに、現地の任意断面地形上で観測された不規則波浪の変形結果に対してもハイブリッド不規則波浪変形理論が適用可能であるかを検討するものである。

## 2. ハイブリッド非線形不規則波浪変形理論の概要

間瀬・Kirby<sup>8)</sup>は、KdV方程式のスペクトルモデルと砕波によるエネルギー減衰の確率モデルを統合したハイブリッド型の断面2次元不規則波浪変形理論を提案した。KdV方程式のスペクトルモデルは、水位変動をFourier級数表示して、それらの複素振幅の非線形モード結合方程式の形で表される。この式は長波近似のものであるから、深海域においても適用可能にするための修正とともに、エネルギー散逸項が導入された。一方、砕波によるエネルギー散逸は、一波毎のエネルギー散逸をboreモデルで算定し、それに砕波している波の確率分布を乗じて算定した確率モデルを、さらに散逸係数の周波数特性を考慮して定式化したものである。

そのハイブリッド不規則波浪変形理論は、以下のよう表される<sup>8)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{dA_n}{dx} + \frac{(C_{g_n})_x}{2C_{g_n}} A_n - ink_1 \left[ \sqrt{\frac{k_n h}{\tanh k_n h}} - 1 \right] A_n \\ + \frac{3ink_1}{8h} \left[ \sum_{l=1}^{n-1} A_l A_{n-l} + 2 \sum_{l=1}^{N-n} A_l^* A_{n+l} \right] + \alpha_n A_n = 0 \end{aligned} \quad (n=1, \dots, N) \quad (1)$$

$A_n$ が求めたい成分波の複素フーリエ振幅、 $x$ は水平座標、 $C_{g_n}$ は成分波の群速度、 $(C_{g_n})_x$ は群速度を $x$ で微分したもの、 $i$ は虚数単位、 $h$ は水深、 $k_1$ は記録時間を $T$ として $(2\pi/T)/\sqrt{gh}$ として求められる基本波数、 $k_n$ は成分波の波数、 $\alpha_n$ はエネルギー散逸係数、 $*$ は共役複素数を表す。式(1)の左辺第2項が浅水変形項、第3項が分散項、第4項が非線形項、第5項がエネルギー減衰項である。

散逸係数 $\alpha_n$ はThornton and Guza<sup>6)</sup>の砕波によるエネルギー散逸率の期待値

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g B^3 \bar{f} \frac{H_{rms}^5}{\lambda^2 h^3} \left[ 1 - \frac{1}{\left\{ 1 + (H_{rms}/\lambda h)^2 \right\}^{5/2}} \right] \quad (2)$$

を用いて定式化された。 $B$ は砕波係数(1とする)、 $\bar{f}$ は代表周波数(スペクトルモーメントから得られる平均周波数)、 $\rho$ は流体の密度、 $g$ は重力加速度、 $H_{rms}$ はr.m.s.波高、 $\lambda$ は $H_{rms}$ と水深 $h$ を結びつける比例定数(0.6とする)である。現地観測および室内実験によれば、バー型地形やステップ型地形にかかわらず、 $\lambda$ は一定値ではなく水深等の条件によって変化する。こうした $\lambda$ の変化を考慮した $\langle \varepsilon_b \rangle$ の算定式を用いることも一つの方法であるが、エネルギー逸散に関するboreモデル自体が経験的で任意定数 $B$ を含むものであるので、 $\lambda$ のみを細かく設定しても近似精度は向上しないと考えられ、 $\lambda$ を一定としても差し支えないものとする。 $H_{rms}$ と $A_n$ には次の関係式

$$H_{rms} = 2 \sqrt{\sum_n |A_n|^2} \quad (3)$$

を用い、式(1)から得られる不規則波列のエネルギー減衰率と式(2)を等しいとおいて

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \alpha_n |A_n|^2 &= \frac{3\sqrt{\pi}}{16\sqrt{gh}} B^3 \bar{f} \frac{\left( 2 \sqrt{\sum_n |A_n|^2} \right)^5}{\lambda^2 h^3} \\ &\times \left[ 1 - \left[ 1 + \left\{ \left( 2 \sqrt{\sum_n |A_n|^2} \right) / \lambda h \right\}^2 \right]^{5/2} \right] \\ &= \beta(x) \sum_{n=1}^N |A_n|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

とする。 $\alpha_n$ は

$$\alpha_n = \alpha_0 + (f_n / \bar{f})^2 \alpha_1 \quad (5)$$

$$\alpha_0 = F\beta(x); \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (6)$$

$$\alpha_1 = (1-F)\beta(x) \bar{f}^2 \frac{\sum_n |A_n|^2}{\sum_n f_n^2 |A_n|^2} \quad (7)$$

とされた。 $F$ はエネルギー散逸の $\alpha_0$ と $\alpha_1$ への配分を定めるパラメータ(0.5とする)である。

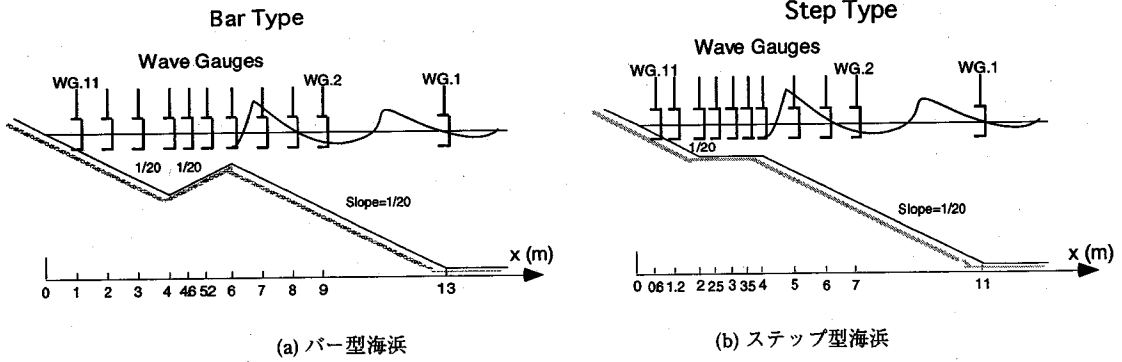


図-1 実験に用いた模型海浜

表-1 波高計の設置水深 (単位: cm)

(a) バー型海浜

WG.1	WG.2	WG.3	WG.4	WG.5	WG.6
45	25	20	15	10	14
WG.7	WG.8	WG.9	WG.10	WG.11	
17	20	15	10	5	

(b) ステップ型海浜

WG.1	WG.2	WG.3	WG.4	WG.5	WG.6
45	25	20	15	10	10
WG.7	WG.8	WG.9	WG.10	WG.11	
10	10	10	6	3	

### 3. 室内実験データおよび現地観測データ

#### (1) 室内実験データ

実験は長さ 27 m, 幅 50 cm, 深さ 75 cm の両面ガラス張り水槽で行った。この水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置されている。用いた不規則波は、ピーク周波数が 0.6 Hz と 1.0 Hz の Pierson-Moskowitz 型スペクトルを持つようにシミュレートしたものである。模型海浜は、図-1 に示す、バー型海浜とステップ型海浜の 2 種類を用い、斜面の法先を造波板から 10 m 離れた地点に設置した。図中に示してある距離は、汀線からの水平距離である。

水位変動は、容量式波高計を用い、浅海域の 10 地点 (WG.2~WG.11) と斜面法先地点 (WG.1) の計 11 箇所で計測した。一樣水深部の水深は 45 cm とした。波高計の設置点の水深は、表-1 に示すとおりである。

水位変動のサンプリング間隔は 0.04 s であり、サンプリング個数は、ピーク周波数が 0.6 Hz の不規則波の場合には 60,000 個、ピーク周波数が 1.0 Hz の場合には 30,000 個とした。ただし、解析に当たってはデータを 1 つおきに用いた。

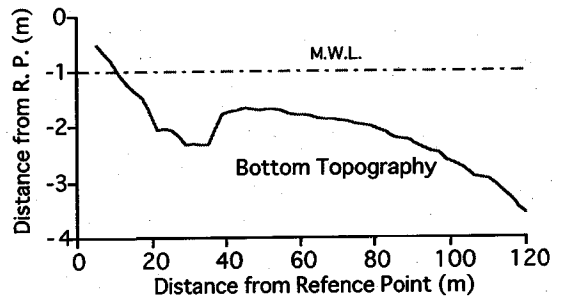
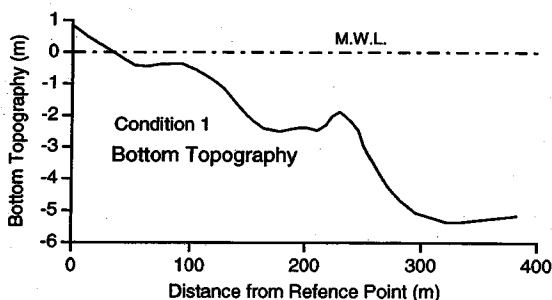


図-2 阿字ヶ浦海岸の海底地形 (堀田・水口<sup>10)</sup>)

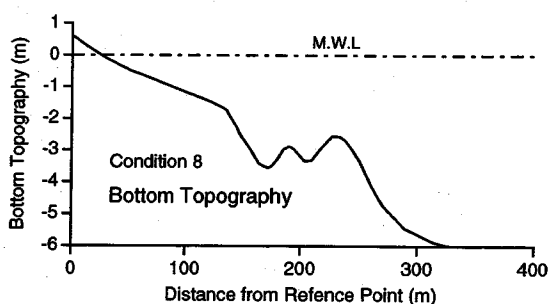
#### (2) 阿字ヶ浦海岸における現地観測データ

解析に用いた現地観測データのの一つは、茨城県阿字ヶ浦海岸にある建設省土木研究所の漂砂調査用栈橋を利用して、1978 年 7 月 5 日に得られたもので、栈橋上に設置された同期した 11 台の 16 mm メモーションカメラによってポール位置での水位変動を撮影することによって得られた (堀田・水口<sup>10)</sup>)。

海底地形および波の諸量は図に示されているので、イメージ・スキャナを用いて、論文の図より海



(a) Condition 1 の海底地形



(b) Condition 8 の海底地形

図-3 波崎海洋研究施設における海底地形 (加藤ら<sup>11)</sup>)

底地形および代表波高を読みとった。図-2 は、読みとった海底地形を図示したものである。

### (3) 波崎海洋研究施設における現地観測データ

解析に用いたもう一つの現地観測データは、加藤ら<sup>11)</sup>によって、茨城県鹿島灘に面する運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設で得られたものである。データは、栈橋上の7台の空中発射式超音波波高計と、栈橋法線上の沖に設置された超音波発射式波高計によって取得された。観測期間は1989年2月25日～3月1日であるが、ここで解析するのは加藤ら<sup>11)</sup>の図-2に示されている時刻1と時刻8のデータである。このデータをそれぞれCondition 1およびCondition 8とする。その時刻の海底地形を図-3に示す。栈橋上の波高計設置点の基準点からの水平距離は、 $x = -30 \text{ m}, 22 \text{ m}, 80 \text{ m}, 145 \text{ m}, 215 \text{ m}, 320 \text{ m}, 378 \text{ m}$ である。

## 4. 任意断面海底地形上の波浪変形

### (1) 室内実験データ

実験では、1) バー頂部に近づくにつれ碎波する波が増加し、2) バー頂部の少し汀線寄りの地点で碎波が顕著であること、3) ステップ型海浜の場合には碎波点がステップ上に幅広く散らばることが観察された。

図-4および図-5は、それぞれバー型海浜およびステップ型海浜におけるスペクトルの変化を示したものである。入射不規則波のピーク周波数はどちらも1.0 Hzである。実線が実測結果であり、点線が計算結果である。理論計算に用いた初期データは、WG.1の水位変動記録を1024個の10セグメントに分けて求めた10組の複素フーリエ振幅 $A_n$ である。成分波の数

は300とした。

図-4の波高計WG.5の位置はバーの頂部であり、スペクトルの実測結果を見ると、初期スペクトルには見られなかった2倍周波数付近のエネルギー密度が増加している。計算結果はその特徴をうまく表している。波高計WG.8の位置はバーの凹部である。ここでは、波高計WG.5で見られた2倍周波数領域でのエネルギーの増加は見られなくなっている。また、ピーク周波数周辺のエネルギー密度が碎波のために減少している。計算結果は高周波領域で実測結果より少し小さくなっている。波高計WG.11の地点は水深がかなり浅く、碎波減衰により全エネルギーが小さくしており、スペクトル形は平坦化している。そのようなスペクトル形状と計算結果は良く一致している。

図-5のステップ型海浜の場合の波高計WG.5の位置はステップの前端であり、それより沖側の地形はバー型海浜のそれと同じであるので、実測のスペクトル形状も図-4の波高計WG.5のそれとほぼ同じである。波高計WG.8の位置はステップ上の地点であり、波高計WG.5で見られた2倍周波数付近のエネルギーピークがここでも見られる。計算結果もそのような傾向が見られるが、実測結果に比べ少し小さくしており、ピーク周波数付近では逆に実測結果より少し大きくなっているが、両者の一致の程度はよい。波高計WG.11では実測結果と計算結果の形状は似ているが、ピーク周波数付近で計算値が実測値より小さくなっている。

図-6にはバー型海浜上の代表波高および代表周期の変化を示した。(a)図はピーク周波数が0.6 Hzのケース、(b)図は1.0 Hzのケースである。波の諸量は、元の水位変動記録からFFT法を利用して4 Hz以上の高周波成分を除去した水位変動記録より計算した。

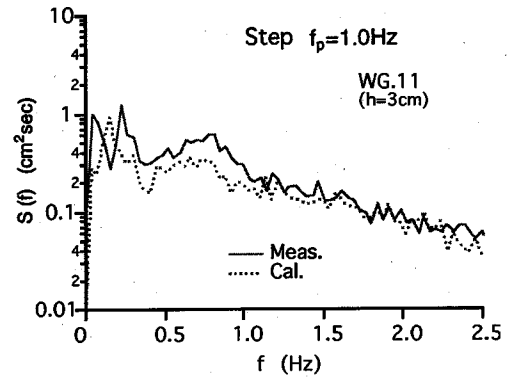
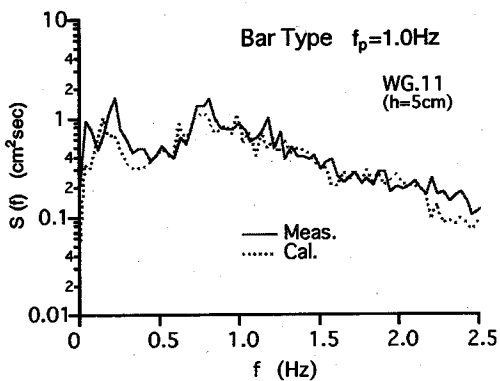
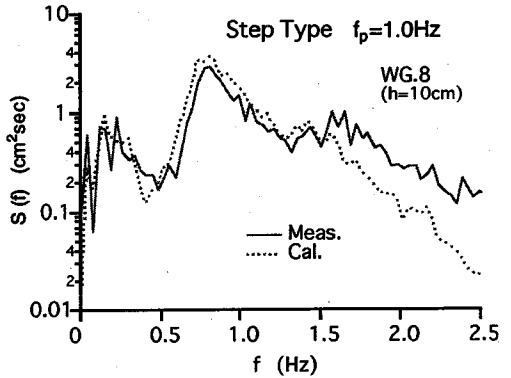
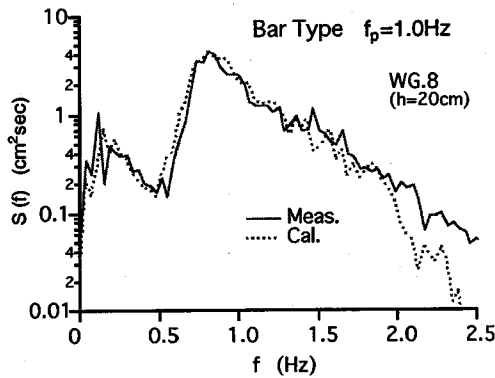
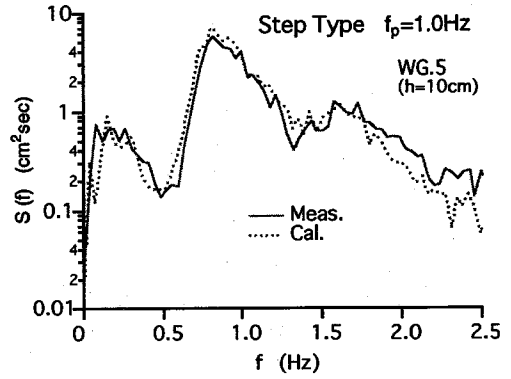
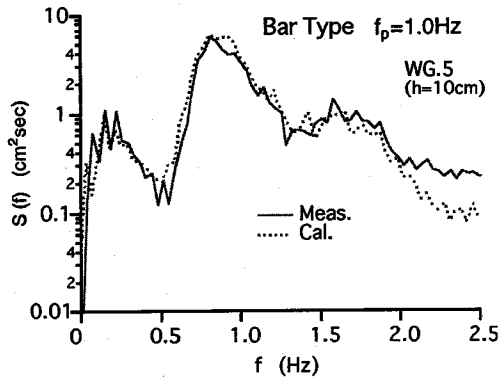


図-4 バー型海浜上のスペクトル変化

図-5 ステップ型海浜上のスペクトル変化

図-6 (a) の  $H_{1/10}$  については、 $3m < x < 6m$  で計算結果が実測結果より大きくなっているが、 $H_{1/3}$  および  $\bar{H}$  についてはかなり良好な一致が得られている。図-6 (b) の代表波高については、計算結果と実測結果との一致はよい。入射不規則波のピーク周波数が小さい（沖波波形勾配が小さい）場合の図-6 (a) の  $H_{1/10}$  に差が見られた原因としては、次のことが考えられる。観測によると碎波はバー頂部の付近で顕著であり、そこから急激に波高が減衰するが、理論ではこう

した碎波の集中といった特徴を考慮していないためである。碎波点の集中があまり顕著でない、入射不規則波のピーク周波数が大きい（沖波波形勾配が大きい）場合である。図-6 (b) では、計算結果と実測結果の一致は良くなる。代表周期の変化については多少の差異は見られるものの、計算結果と実測結果との一致の程度は悪くない。

図-7 はステップ型海浜地形上での波の諸量の変化を示したものである。この図の代表波高の変化におい

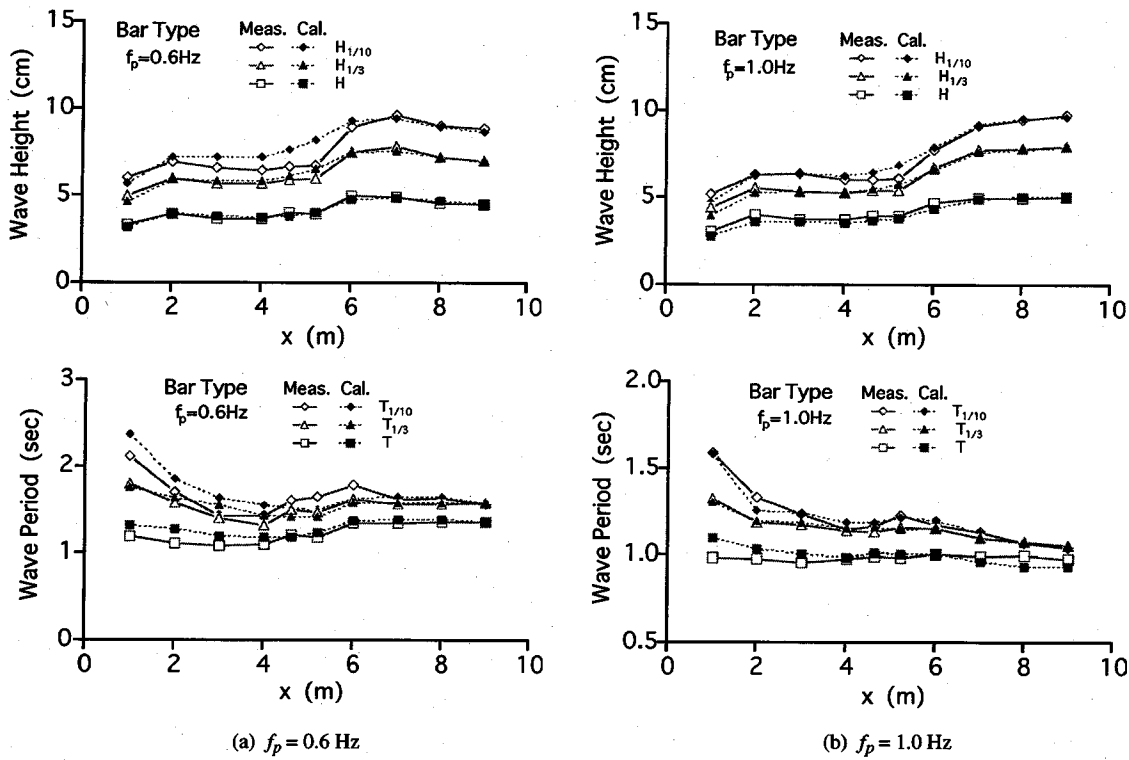


図-6 バー型海浜上の代表波高および周期の変化

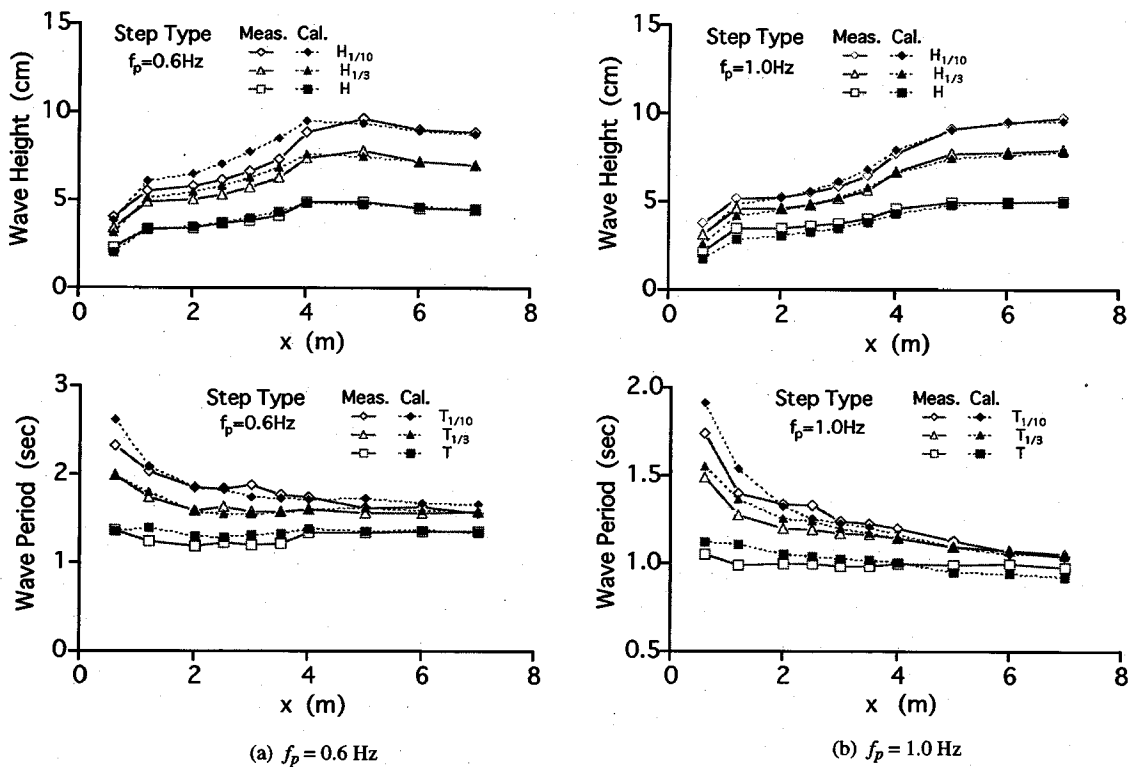


図-7 ステップ型海浜上の代表波高および周期の変化

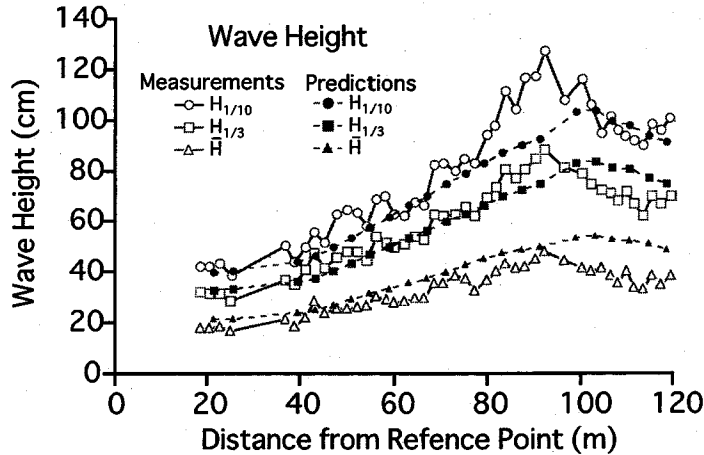


図-8 阿字ヶ浦海岸における代表波高の変化

でも、図-6と同様の傾向、すなわち、入射不規則波のピーク周波数が小さい場合には波高の計算結果は実測結果よりステップ上で大きくなり、ピーク周波数が大きい場合には両者の一致が良くなるという傾向が見られる。代表周期については、汀線に向かってその値が徐々に大きくなる様子が理論でうまく表現できている。

## (2) 阿字ヶ浦海岸における現地観測データ

初期入力データを作成するための水位変動記録は持ち合わせていないので、次のように初期データを作成した。

$x = 120 \text{ m}$ における入射波スペクトルとして次式のBretschneider-Mitsuyasu型スペクトルを用いた。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp\{-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}\} \quad (8)$$

ただし、波高変化の図面を参考にして、 $H_{1/3} = 0.9 \text{ m}$ 、 $T_{1/3} = 10 \text{ s}$ とした。このスペクトルから周波数成分の振幅  $a_n$  を計算し、また乱数を発生させて作成した位相  $\theta_n$  ( $0 < \theta_n < 2\pi$ ) を用いて、複素フーリエ振幅を

$$A_n = a_n \cos \theta_n + i a_n \sin \theta_n \quad (9)$$

で与えた。このような10組の複素フーリエ振幅を作成し、これらに対して式(1)による変形計算を行い、逆フーリエ変換により水位変動を求め、これより波の

代表量を計算した。このようにして求めた計算結果と実測結果の比較結果を図-8に示す。 $x = 90 \text{ m}$ 付近では、実測結果の  $H_{1/10}$  (○印で示す) が急激に大きくなっている。計算結果はこうした急激な波高の増大を表すことはできないが、全体の変化傾向はうまく表せている。特に、有義波高 (□印と■印で示す) についての一致がよい。

## (3) 波崎海洋研究施設における現地観測データ

初期データは、棧橋法線上の汀線から距離 1.3 km の水深が約 9 m の海底に設置された超音波波高計 W8 による水位変動記録をフーリエ変換して求めた10組の複素フーリエ振幅である。棧橋先端から 1.3 km 沖までの海底地形は、一様勾配地形で近似した。

予備計算によると、スペクトルや代表波高の計算結果は実測結果を過小評価する傾向にあった。そのため、式(2)のエネルギー逸散率を0.7倍することにした。これは、現地は平面2次元で、また方向分散性を有することもあり、理論の前提である断面2次元変形の場合よりエネルギー逸散を小さくするのが良いと考えたことによる。

図-9は、Condition 1 および Condition 8 のスペクトル変化を示したものであり、図中の  $x$  の値は棧橋基準点からの水平距離を表す。Condition 1 では、W5 ( $x = 215 \text{ m}$ ) の高周波領域と低周波領域で、W4 ( $x = 145 \text{ m}$ ) では低周波領域からピーク周波数付近で実測結果と計算結果の差が若干見られるが、満足できる一致が得られている。Condition 8 においては、W5 ( $x = 215 \text{ m}$ ) でス

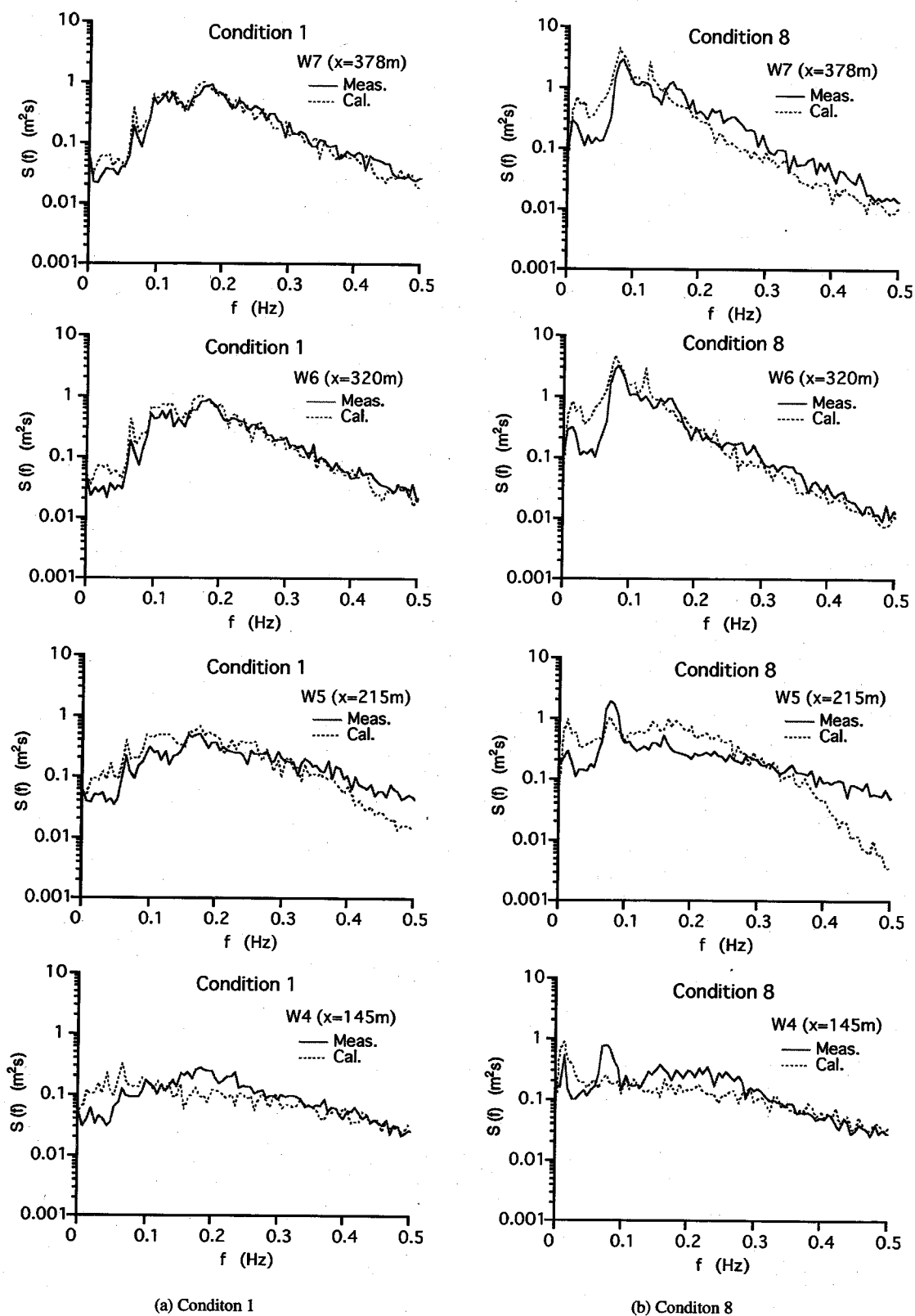
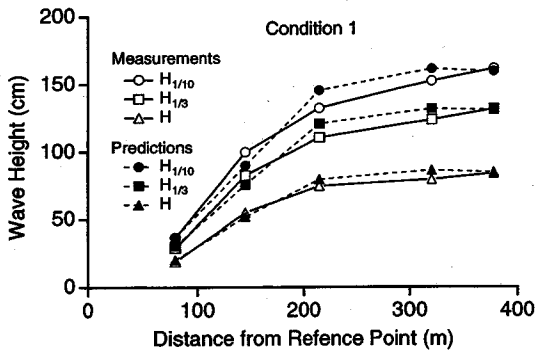
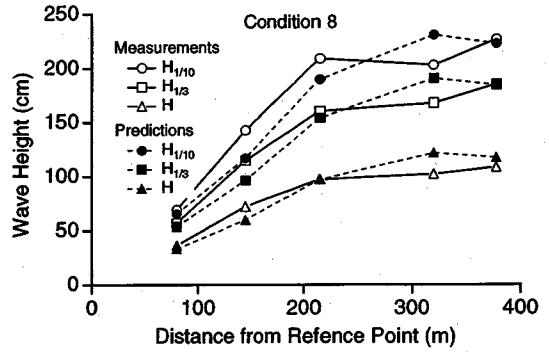


図-9 波崎で観測されたスペクトル変化





(a) Condition 1



(b) Condition 8

図-10 波崎で観測された代表波高の変化

ベクトル形状に差異が見られる。理論は断面2次元変形を前提としており、現地の状況とはかなり異なるにもかかわらず、図-9における一致の程度は良い。

図-10は代表波高の変化を示したものである。これらの代表量は、元の水位変動記録から0.01 Hz以下、および1 Hz以上の成分を除去した水位変動から求めたものである。Condition 1では $x=145$  mで実測結果が若干大きくなっている。Condition 8では場所によって変動はあるものの、実測結果と計算結果との一致は概して良い。

## 5. あとがき

本研究は、室内実験結果および2つの異なる現地の観測結果に見られる任断面地形上の不規則波浪の変形過程を、ハイブリッド不規則波浪変形理論で表現可能であるかどうかを検討したものである。

室内実験によるバー型海浜およびステップ型海浜地形上の波浪変形予測に関しては、スペクトルおよび代表波高・周期の変化特性をかなりうまく表現することが可能であった。ただし、入射不規則波のピーク周波数が小さい場合（沖波波形勾配が小さい場合）には、バーを通過した地点およびステップ上で特に高波高の計算結果が実測結果より大きくなる傾向にあったが、これは理論において砕波点の集中といった特徴を考慮していないためである。沖波波形勾配が大きく、砕波点の集中があまり顕著でない場合には特に、計算結果と実測結果の一致はよい。

阿字ヶ浦海岸での波浪変形に関しては、計算結果は特定の地点の急激な波高の増大を表すことはできないが、概ね良い予測ができた。ただし、観測で得られた

この波高の急激な増大については、これが一般的な現象か、あるいは、観測精度、データ整理上の問題であるかの検討の余地がある。波崎海洋研究施設において観測されたデータについては、理論は断面2次元変形を前提としたものであり、現地の状況と異なるにもかかわらず、理論におけるエネルギー逸散率を小さくすれば、スペクトルおよび代表波高の変化に関して実測値と計算値の対応はかなり良かった。ここでは特別に波浪状況を考慮せず、期待エネルギー逸散率に0.7を用いた結果両者の対応が良かったが、この点については他の異なる多くのデータを用いて検討が必要である。

最後に、本研究は近畿建設協会研究開発助成によるものであり、ここに感謝致します。また、ここで解析した波崎海洋研究施設における波浪データは運輸省港湾技術研究所より提供して頂いたものであり、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，237p.，1982.
- 2) 間瀬 肇：不規則波の浅水・砕波変形，第28回水工学に関する夏期研修会講義集，B-4，土木学会水理委員会，1992.
- 3) Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Coastal Eng. Conf.*, pp.569-587, 1978.
- 4) 水口 優，松田仲次：現地不規則波浪の浅海変形について，第27回海岸工学講演会論文集，pp.134-138, 1980.
- 5) 佐藤道郎，小部直人：バー型海浜における不規則波の砕波変形，第30回海岸工学講演会論文集，pp.104-108, 1983.
- 6) Thornton, E.B. and R.T. Guza: Transformation of wave

- height distribution, *Jour. Geophys. Res.*, Vol.88, pp.5925-5938, 1983.
- 7) 間瀬 肇, 岩垣雄一: 複合断面の海浜における不規則波の碎波変形特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.25-29, 1984.
- 8) 間瀬 肇, J.T. Kirby: 不規則波のハイブリッド型断面2次元非線形変形理論, 土木学会論文集, No.479, II-25, pp.91-100, 1993.
- 9) 間瀬 肇, 小沢勇介: 双峰型スペクトル波の浅海変形, 土木学会論文集, No.509, II-30, pp.183-191, 1995.
- 10) 堀田新太郎, 水口 優: 碎波帯の波の現地観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.152-156, 1979.
- 11) 加藤一正, 中村聡志, 池田直太: 波の連なりと長周期波の関連に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.101-105, 1990.

(1995. 4. 10 受付)

## PREDICTION OF RANDOM WAVE TRANSFORMATION OVER ARBITRARY VARYING TOPOGRAPHY BY HYBRID WAVE THEORY

Hajime MASE and Yusuke OZAWA

This study examines the applicability of hybrid wave theory employing a modified spectral KdV equation model and a probabilistic bore breaking model to predict transformation characteristics of random waves over arbitrary varying bottom such as bar-type and step-type beaches. Comparisons of measured energy spectra and representative wave quantities with predicted ones show the capability of the hybrid wave theory as a wave prediction model.