

段階的碎波係数を導入した3次元地形場の 不規則波浪変形計算

COMPUTATION OF RANDOM WAVE TRANSFORMATIONS IN 3-D BATHYMETRY USING GRADATIONAL BREAKER INDEX

合田良実
Yoshimi GODA

フェロー 工博 横浜国立大学名誉教授 (株) エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

A new system of gradational breaker index is introduced to facilitate the computation of random wave transformations in shallow water. The parabolic equation is used to compute wave shoaling, refraction, and diffraction. Computation is made with multiple levels of wave heights under the Rayleigh distribution. Wave breaking is assumed to occur when the ratio of wave height to local water depth exceeds the breaking index, which takes the largest value for largest wave height level and gradually decreases as the wave height level goes down.

The new system succeeds in reproducing the random wave breaking diagrams by Goda (1975), and shows good agreements with various experimental results on wave transformations over bar and trough topographies, elliptical shoals, and artificial reef systems.

Key Words: Random waves, wave breaking, partial breaking indices, wave breaking diagrams, horizontal step, reef, elliptical shoal, artificial reef

1. まえがき

不規則波の変形計算においては、碎波の取扱が大きな課題である。しかし、碎波時の大規模渦の発生によるエネルギー消散の過程が非常に複雑であって、その数学的取扱が不可能に近く、碎波の様相が不規則波の1波毎に異なることもあって、碎波過程のモデル化が非常にむずかしい。

浅海域における不規則波浪の碎波変形を扱う際には、実際の海岸で観察され、あるいは必要とされる以下の4条件を満たすことが求められる。

- 1) どの水深においても波高の確率密度関数が滑らかに変化する形状を保つこと。
- 2) 波高分布が沖合および汀線近傍ではほぼレーリー分布に近く、碎波帯の中央付近ではこれよりも狭い分布形状であること。
- 3) 初期水深ゼロの汀線においても有限な波高値を保持すること。
- 4) バー・トラフ地形など海底勾配が急変する地形においても合理的な波高値を算出できること。

現状においては、上記の4条件をすべて満たす算定方法は提案されていない。たとえば、著者が1975年に提案した方式¹⁾は1)~3)を満たすけれども、一様斜面勾配を仮定しているために複雑な海底地形を扱うことができず、4)の条件を満たさない。

本論文では、放物型方程式による波浪変形計算を

レーリー分布の各波高レベルについて行い、その際に水深で規定される碎波限界を波高レベル毎に変える方式を採用する。すなわち段階的碎波係数を導入する。これによって上記の4条件をほぼ満足する計算を遂行できることが明らかになったので、本方式の内容およびその適用性を各種実験結果で検証した結果について報告する。

2. 計算モデル

(1) 放物型方程式

本論文では、著者が縦型人工リーフの研究²⁾でこれまで使用してきた、平口・丸山³⁾による式(1)の放物型方程式を使用する。この方程式は、斜め入射波による屈折効果を的確に解析することができる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left\{ i \left(k_x + \frac{k_y^2}{2k_x} \right) - \frac{1}{2k_x c c_g} \frac{\partial}{\partial x} (k_x c c_g) \right\} \phi + \frac{i}{2k_x c c_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(c c_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - f_D \phi \quad (1)$$

ここに、 ϕ は速度ポテンシャル、 k_x 、 k_y は x 、 y 方向の波数、 c は波速、 c_g は群速度、 i は虚数単位であり、波速は著者による非線形効果²⁾を考慮している。また、 f_D は次項に述べる碎波減衰を表す関数である。

(2) 碎波減衰項の取り扱い

本論文では縦型人工リーフの解析と同様に, Dally ほか⁴⁾の考え方に準拠した式(2)の関数を使用する.

$$f_D = \begin{cases} 0 & : a < \gamma h \\ \frac{\alpha}{2h} \left[\left(\frac{a}{\gamma h} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} & : a \geq \gamma h \end{cases} \quad (2)$$

ここに, h は水深, a は振幅 (= $H/2$, ここに H は波高), γ は碎波限界振幅と水深との比, α は定数であって本論文では縦型人工リーフ²⁾のときに定めた $\alpha = 0.125$ の値を用いる. 以下においては, 簡単のために γ を碎波係数と呼ぶ.

(3) 不規則波計算用の波高レベルの設定

規則波の屈折・回折変形に対する放物型方程式を不規則波に適用するには, まず波高分布の広がりに対して各波高レベルに関する計算を行い, その結果を重ね合わせる. ここでは, 沖波の波高がレーリー分布に従うことを前提とし, 式(3)を用いて出現確率が等しい M 個の波高代表値を求める. これは, レーリー分布を等面積の $2M$ 個に分割し, その波高区分の奇数番目の波高値を採択したものである.

$$H_m = 0.706(H_{1/3})_0 \left[\ln \frac{2M}{2m-1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

ここに, 順序数 m は波高の大きい方からの番号であり, $(H_{1/3})_0$ は沖波有義波高である. ただし, これ以降では簡単のために H_0' で表記する.

(4) 段階的碎波係数の設定

ここでもし碎波係数 γ を全波高レベルに共通に設定すると, 碎波帯内では波高分布が上限値 $H_b = 2\gamma h$ で断ち切られる形となり, 1. で述べた第1の条件を満たすことができない. また, このように碎波限界波高を水深に比例する形に設定したのでは, 初期水深ゼロの汀線で波高もゼロとなり, 第3の条件を満たすことができない.

このため, 碎波係数を波高レベル毎に式(4)のように与えることにした. 式中の L_0 は(6)項に述べる各周波数に対する深海波長, H_m, H_1 は式(3)で求められる波高レベル, i はここでは海底勾配であり, C_b, β_0, p は経験的定数である. なお, 水深波長比 h/L_0 が0.2を超えるときは碎波減衰が生じないものとみなし, すべて $h/L_0 = 0.20$ における値を代用する.

$$\gamma_m = \left(C_b \frac{L_0}{h} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{1.5\pi h}{L_0} (1 + 15i^{2.5}) \right] \right\} + \beta_0 \frac{H_m}{h} \left(\frac{H_m}{L_0} \right)^{-0.38} \exp(30i^2) \right) \times \left(\frac{H_m}{H_1} \right)^p \quad (4)$$

ここに使われる C_b, β_0, p の定数については, 一様勾配斜面における著者の碎波変形モデルとできる

だけ一致する結果が得られるように, 試行錯誤を繰り返して次のように設定した.

$$C_b = 0.080, \quad \beta_0 = 0.016, \quad p = 0.333 \quad (5)$$

なお, ここでの碎波係数は式(2)のように振幅に対する値である. また, この C_b 値は波高の分割数 M が十分に大きい場合であって, M が小さいときにはやや小さくする必要がある. $M = 100$ では $C_b = 0.075$ が適当である.

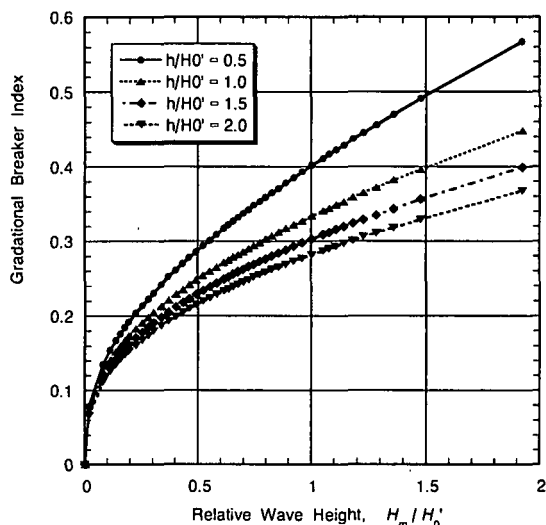


図-1 波高による段階的碎波係数 γ_m の変化の計算例 (海底勾配 $i = 1/20$, $H_0/L_0 = 0.04$)

式(4)に基づいて段階的碎波係数を計算した例が図-1である. 成分波数を $M = 831$ とし, 相対水深が $h/H_0' = 0.5, 1.0, 1.5, \& 2.0$ の場合を示している (図中の記号は順序数 m の10番目ごとの値である). 水深が浅くなるにつれて碎波係数は全体的に大きな値を取る. また, 波高の小さい成分波は碎波係数が小さく設定される. たとえば, $m = 1$ の波高最大の成分波は上記の相対水深において, 碎波限界波高が水深の0.73~1.13倍であるのに対し, $H_m = 0.5H_0'$ の成分波は碎波限界が水深の0.46~0.62倍に設定される.

なお, $M = 831$ としたのは, 式(3)において $m = 1 \sim 3$ 個の成分波の波高の平均値が $H_{1/250} = 1.80H_{1/3}$ の関係を満たすことを利用し, 著者の碎波変形モデルとの対比を容易にするためである.

(5) 複雑地形における勾配の設定法

リーフや沿岸砂州のような複雑地形では海底の勾配が場所ごとに異なる. 波の屈折や回折変形は小規模な地形変化には反応せず, 波長の数分の一以上の規模の変化に呼応して波が変形すると考えられる. そこで, 本モデルでは碎波変形計算における海底勾配として, 計算格子点から沖側へ $(L_p)/3$ だけ離れた格子点間の水深の差から勾配を求め, 計算地点の海底勾配とした (負の場合は0とする). 計算を簡単にするため, 波が斜めに進む場合でも勾配は x 軸方向に対するものを使用している.

(6) 波向・周波数成分の重ね合わせ法

海の波は個々波の波高が不規則に変動するだけでなく、方向スペクトルで表される波向・周波数の広がりを持っている。本モデルでは(3)項で述べた各波高レベルの計算を行う度に、方向スペクトルの広がり考慮した線形重ね合わせ計算を行う。方向スペクトルとしては、JONSWAP型の周波数スペクトルと光易型方向分布関数の組合せを標準とする。

まず、スペクトルピークの尖鋭度パラメータが1.0の場合にエネルギーを等分割する周波数 f_n を式(6)で定める。

$$f_n = 1.057 f_p \left[\ln \frac{2N}{2N - 2n + 1} \right]^{-1/4} \quad (6)$$

ここに、 f_p はスペクトルのピーク周波数であり、序数 $n = 1$ は最大周波数を表す。尖鋭度パラメータ γ が1よりも大きいときには、それによってエネルギー密度が増大させられる割合に応じて周波数成分の本数を増加させる。たとえば、 $\gamma = 2$ のときは本数が当初の1.23倍、 $\gamma = 20$ では4.3倍となる。

成分波の周波数が選定されたならば、あらかじめその周波数に対する方向分布関数の方向別累加曲線を作成する。本モデルでは主波向から $\pm 0.55\pi$ ($10/S_{\max}$)^{0.35} の範囲を100等分して累加曲線を求めている。そして、[0, 1]の範囲の一樣乱数を使って、その乱数値に対応する方向角を求める。すなわちシングル・サンメーション法である。ただしそのままでは、成分波の波向が主波向のまわりに非対称な分布形となることが避けられない。このため、成分波ごとに主波向に対称な方向の成分波を付加した。したがって、方向スペクトル成分の個数は $2N$ である。

全体としての繰り返し計算回数は $M \times 2N$ となる。各波高レベルでの方向スペクトル成分の計算結果を合成する際には、これらの成分波のエネルギーが等しくなるように設定してあるので、算術平均方式を用いる。

3. 一樣勾配斜面における砕波変形

(1) 砕波に伴う波高確率密度関数の変化

不規則砕波に関する計算方式の検証としては、著者が1975年に提案した、波高確率密度関数の形状を砕波に応じて緩やかに整形するモデルがしばしば用いられる。これを基本モデルと呼んでおく。1.で述べたように、不規則波の砕波変形計算では沖合から汀線に至る各地点の波高分布が滑らかに変化することが要求される。

今回の計算方式についてこの点を調べた1例が図-2である。成分波数を $M = 831$ とし、 $H_0 = 4.0$ m、 $(L_p)_0 = 100.0$ m、海底勾配 $i = 1/100$ の条件での計算結果である。なお、本節では方向分散を導入しない一方向不規則波を考え、 $\gamma = 1$ として $N = 10$ 成分の計算を行っている。

波高の確率密度は、波高の出現頻度を級幅 $\Delta H =$

0.2mで数えた結果から換算した。水深が十分に大きな $h/H_0' = 10.0$ では波高はレーリー分布に従っている。 $h/H_0' = 2.0$ (水深8.0m)では波高6.0m以上が砕波のために姿を消し、その分だけ波高4.0~4.6mの出現頻度が高まる。しかし、それ以下の波高では変化が小さい。 $h/H_0' = 1.5$ (水深6.0m)では波高4.6m以上が消えて、その代わりに波高2.5m付近に分布のピークが現れる。 $h/H_0' = 0.5$ (波高2.0m)以下ではレーリー分布とほとんど同じである。水深が4.0m、2.0mと減少するにつれて波高分布が波高の小さい方へ寄っていく。

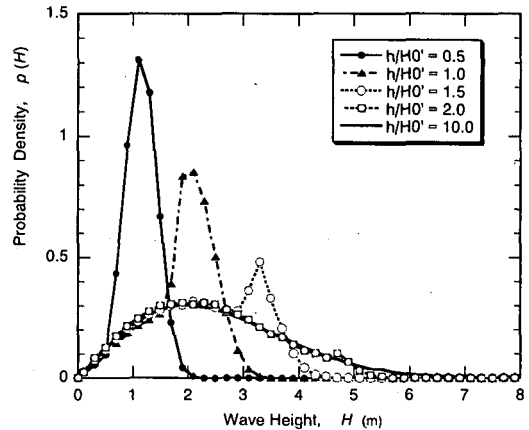


図-2 波高確率密度関数の変化の計算例

このように、砕波帯内で波高分布が二山形になる難点があるものの、特定の波高に集中することはなく、実際の波高分布に近い結果となっている。

(2) 一樣斜面上の波高変化

今回の計算方式で一樣勾配の海岸における波高の変化を求めた結果を、海底勾配1/20のケースについて図-3に示す。いずれも最高波高 H_{\max} および $H_{1/3}$ の H_0' に対する比として示している。計算ケースは波形勾配 $H_0/L_0 = 0.02$ と 0.04 である。基本モデルは連続曲線、今回の計算結果はそれぞれの記号で表示されている。

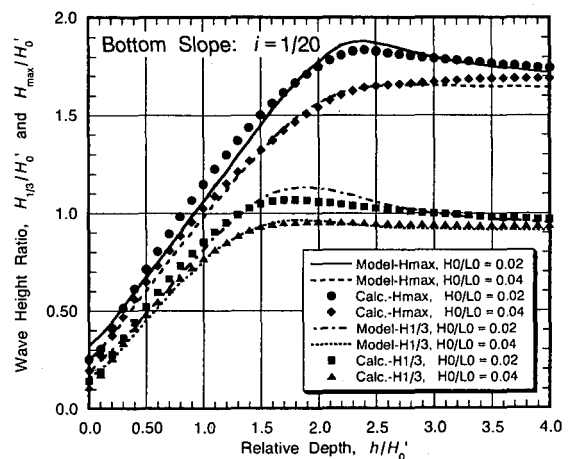


図-3 海底勾配1/20の斜面上の H_{\max} と $H_{1/3}$ (基本モデルと新方式との比較)

図-3に見られるように、今回の計算結果は基本

モデルとほぼ整合している。相対水深 $h/H_0' = 3.0$ 以上で今回の計算がやや大きいのは、浅水変形に対するスペクトル導入の影響であり、 $h/H_0' = 1.5 \sim 2.5$ の範囲で逆に小さめとなっているのは、放物型方程式が線形計算であり、基本モデルで使われている非線形浅水効果を取り込んでいないためである。

図示は省略したが、海底勾配 1/10, 1/30 および 1/100 のケースも今回の計算結果が基本モデルとよく整合しており、式(4), (5)の段階的碎波係数を用いた計算モデルは、碎波変形に係わる各種の計算に使用できるものと判断できる。

(3) 代表波高間の比率の変化

新方式の特長は、どの地点においても波高分布を計算できることである。したがって、碎波帯の中央付近で波高分布がいったん狭まり、汀線付近で再び広がる傾向を再現することができる。図-4はその計算結果の一例で、海底勾配 1/30, 波形勾配 0.04 の場合である。波高比としては、 $H_{max}/H_{1/3}$, $H_{1/20}/H_{1/3}$, および $H_{mean}/H_{1/3}$ の 3 種類を示してある。このうち $H_{1/20}/H_{1/3}$ は、斜面被覆材の安定質量の計算に用いられるパラメータ⁵⁾である。

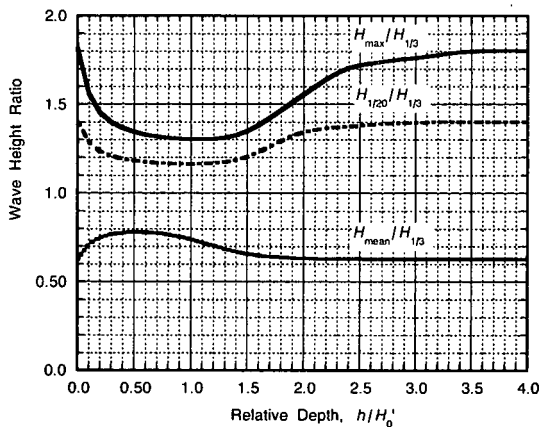


図-4 相対水深による波高比の変化
(海底勾配 1/30, 波形勾配 0.04)

今回のモデルによる波高比の変化は、基本モデルと若干の差があるものの、碎波帯内の波高変化の様相をかなり良く再現しているといえる。

4. バー・トラフ地形周辺の波高変化

現地の海岸では、1列あるいは数列の沿岸砂州が発達し、それぞれの岸側には水深が深まるトラフが出現するのが普通である。こうしたバー・トラフ地形に対する本モデルの適用性について、実験データと比較する。

図-5は、権・合田⁶⁾が提示したバー・トラフ地形での不規則波実験結果と本モデルによる計算結果を比較したものである。ここに示したのは、バー上の水深が 9 cm のときのケースであり、波浪条件は $H_0' = 10.4$ cm, $T_{1/3} = 0.98$ s である。実験値としては

$H_{1/3}$ と H_{mean} のみが提示されているが、参考として $H_{max} = H_{1/250}$ の計算値も併せて示した。

バーの頂部までの波高変化は本モデルでも的確に計算できている。バーの頂部を越えたトラフでの波高は、本モデルの計算値がやや高めである。これは、波が砕けて進行する過程での乱流渦によるエネルギー逸散のプロセスが、Dally型碎波減衰方式では十分に表現できないためと思われる。

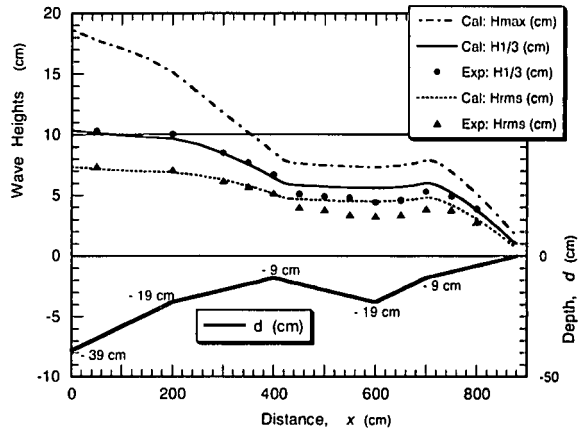


図-5 バー・トラフ地形における実験値と計算値の比較: $H_0' = 10.4$ cm, $T_{1/3} = 0.98$ s

さらに大型の実験データとして、Kraus et al.⁷⁾が報告したSUPERTANKと名付けられた海浜変形実験プロジェクトがある。 $H_0' = 60 \sim 80$ cm の不規則波を一樣勾配の砂斜面に作用させ、海浜変形・波・流れを測定した。このうちの顕著なバーの発達が見られたケース S0913A の実験値を計算値と比較したのが図-6である。なお、海浜地形は入力を簡略化するために折れ線形状で近似している。

本モデルは、バー周辺での $H_{1/3}$, H_{rms} の変化を計算できるものの、バーの背後で実験値の減衰が大きく、計算値がこれに追随しきれていない。この傾向は、権・合田⁶⁾の実験データの場合と同様である。なお、どちらかといえば $H_{1/3}$ のほうが実験値と計算値の差が少ない。

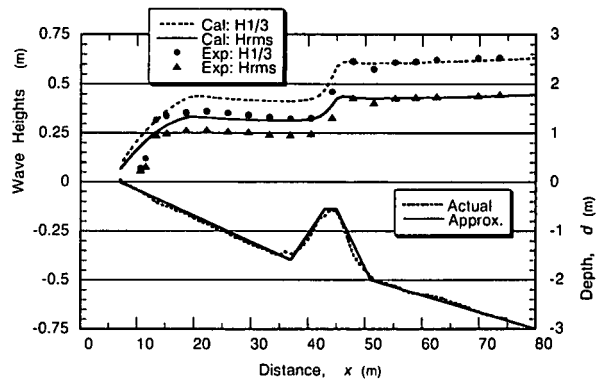


図-6 SUPERTANKの波高変化の実験値と計算値の比較: ケース S0913A, $H_0' = 0.632$ m, $T_p = 2.8$ s

Larsen⁸⁾ は不規則波の碎波変形モデルを発表し、このSUPERTANKのデータについてその適用性を検

証している。しかし、バー背後の強い波高減衰は本モデルの計算と同様にうまく再現できておらず、計算値が過大である。Dally型碎波減衰方式を用いているためであり、実験値との乖離の具合も同程度である。なお、Larsenのモデルでは H_{rms} 値しか出力されないのに対し、本モデルでは $H_{1/3}$ をはじめとして、碎波帯内の各種代表波高を計算できることが特長であり、構造物の設計計算等への適用範囲が広い。

6. 楕円形浅瀬周辺の波高変化

本モデルの基本である放物型方程式は、屈折・回折が併存する波浪変形場に適用することができる。円形あるいは楕円形浅瀬はその頂部付近に屈折した波が集中し、そこから回折波が新たに発生することが知られている。この現象を多方向不規則波を使って実験的に調べたのが Vincent・Briggs⁹⁾である。

VincentとBriggsは、幅35m、奥行き29mの多方向造波平面水槽内に、底面の長径が3.96m、短径が3.05mの楕円形浅瀬を設置した。周辺の水深は一律で0.457m、浅瀬の頂部水深は0.157mである。楕円の長径は造波板と平行であり、楕円形浅瀬の中心は造波板から6.096mの位置にある。

実験波は、TAM型周波数スペクトルと正規分布型方向関数の組み合わせで与えており、前者は尖鋭度パラメータ γ 、後者は方向分散の標準偏差角 σ_m でその特性が表される。この論文では光易型方向分布関数を用いているので、ほぼ同一の σ_m を与える S_{max} の値を選んだ。なお、スペクトルピーク周期はすべて $T_p=1.3s$ である。

数値計算は、格子間隔を $\Delta x = \Delta y = 0.1524m$ とし、 x 方向111格子、 y 方向151格子を用いた。周波数・波向成分は一方不規則波のU3ケースが24、方向分散角が $\sigma_m=10^\circ$ と小さいNシリーズが $2N=130$ 、方向分散角が $\sigma_m=30^\circ$ と大きなBシリーズが $2N=148$ である。波高レベルの分割数は、 $M=60$ とし、式(5)の碎波係数の定数は $C_b=0.075$ に低減したものをを用いた。パソコンによる計算時間は、1ケース30分程度であった。

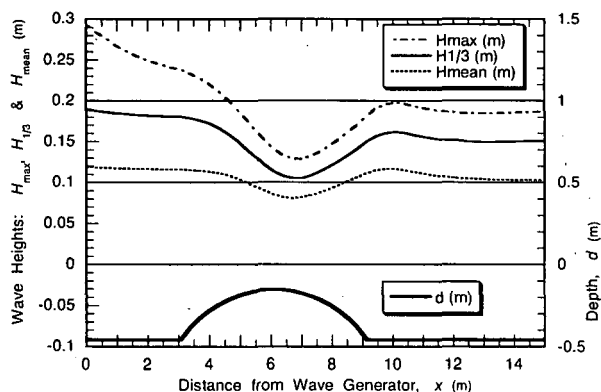


図-7 浅瀬中心軸を通る縦断方向の波高分布 (ケースB5: 代表波高の差異による比較)

まず図-7は、 $H_{1/3} = 19.0cm$ のケースB5の縦断方向の波高の計算結果であり、 H_{max} 、 $H_{1/3}$ および H_{mean} が浅瀬の頂部で碎波減衰のために減少し、浅瀬の背後でやや増大する状況を示している。なお、浅瀬前方の一樣水深部でも減衰が始まっているのは、水深45.7cmに対して有義波高が19cmとかなり大きいためである。

波高測定の実験結果が提示されているのは、浅瀬中心から6.1m後方のTransect 4と名付けられた横断面に沿ったもので、沖波波高に対する波高比としてグラフ化されている。その値を図から読みとって計算値と比較したのが図-8、9である。

図-8は一方不規則波であるU3および方向分散の小さなN4、N5のケースにおける計算値と実験値の比較である。有義波高はU3とN4が2.54cm、N5が19.0cmである。波高の小さなU3とN4では、実験値と計算値がよく一致し、放物型方程式で浅瀬周辺の波高分布を的確に求められることを示している。有義波高が19.0cmと大きくて碎波影響の著しいN5のケースでは、波高分布の傾向が実験と計算でずれている。ただし、横断面全体の平均値で見ると、計算値と実験値はほぼ合致している。

図-9は、有義波高2.54cmのケースB3および波高19.0cmのケースB5についての比較である。前者の計算値は実験とほぼ一致しているが、後者は波高分布の傾向にやや食い違いがある。なお、Dr. BriggsよりN3とN4、B5とN5が入れ替わって論文に記載されたとの連絡があり、真値をプロットしている。

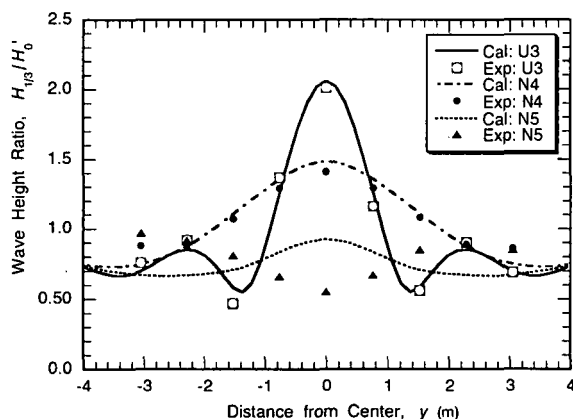


図-8 方向分散が狭い実験ケースと計算との比較 (浅瀬中心から6.1m後方のTransect 4の断面)

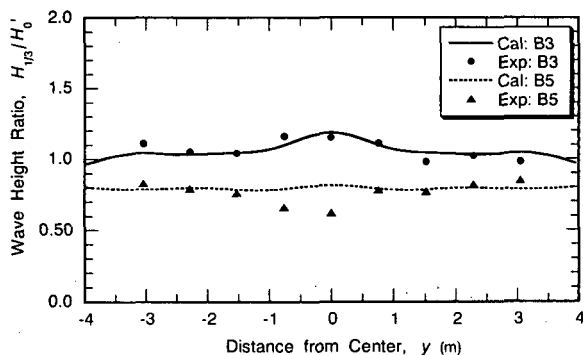


図-9 方向分散が広い実験ケースと計算との比較 (浅瀬中心から6.1m後方のTransect 4の断面)

7. 人工リーフ周辺の波高変化

著者は先に縦型人工リーフの構想を提唱し、水理模型実験と放物型方程式による計算を行い、通常的人工リーフとの比較を行った²⁾。この実験データのうち、人工リーフについて本モデルで波高分布を計算した結果を図-10, 11に示す。なお、実験データは文献¹⁰⁾に記載の図に基づく。

人工リーフは、沿岸方向の天端長が100 cm、岸沖方向の天端幅が45 cm、天端水深が3 cmの寸法であり、勾配1/20の一樣斜面上に2基を中心間隔1.8 mで設置した。図-10は2番目の人工リーフのほぼ中央を横断する岸沖方向の波高分布を示す。波はBretschneider-光易型スペクトルの不規則波2種類を用い、いずれも入射角 -15° で一樣水深30 cmの地点から1/20勾配斜面に斜め入射させている。計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 5$ cmである。なお、図-11の水深図は測定位置ではなく、リーフの設置状況が分かるように水深12.5 cmの場所のものを示している。

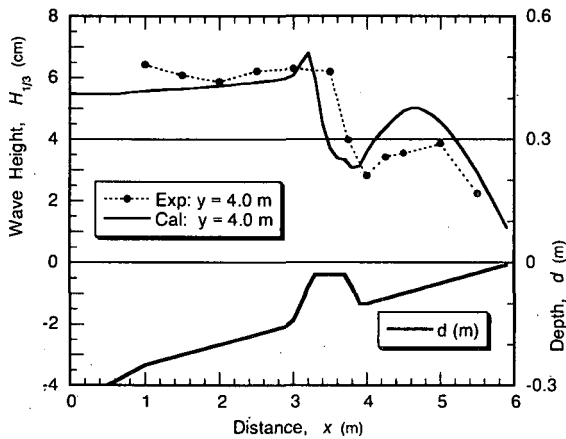


図-10 $(H_{1/3})_I = 5.5$ cm, $T_{1/3} = 1.6$ s の不規則波に対する人工リーフ横断面の岸沖方向の波高分布

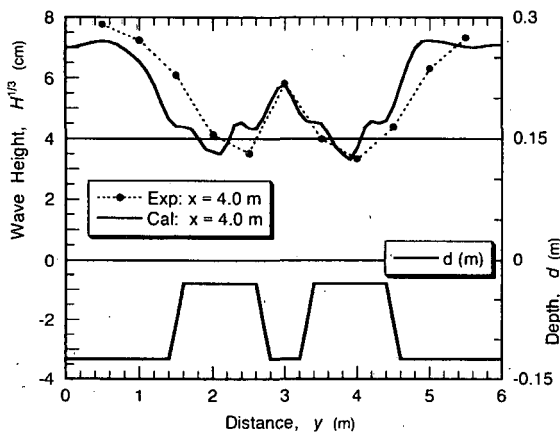


図-11 $(H_{1/3})_I = 7.5$ cm, $T_{1/3} = 1.2$ s の不規則波に対する人工リーフ背後の沿岸方向の波高分布 (水深10.0 cm)

これらの結果を見ると、実験値と計算値に若干の差異があるものの、全体としては数値モデルが人工リーフ周辺の波高分布をかなりよく再現しており、こうした人工構造物への適用性を例証している。

8. むすび

複雑な形状の海底地形に対して碎波を伴う波浪変形を求める手法として、新しい方法を提案した。その要点および結論は以下の通りである。

1. 碎波による波浪減衰を求める際に、水深に対する碎波限界波高比を波高のレベルごとに段階的に変える方式を案出した。これを段階的碎波係数と呼ぶ。
2. 計算は、あらかじめ設定した多数の波高レベルごとに行い、方向スペクトルから求められる成分波の全てについての計算結果をエネルギー的に合成する。
3. 段階的碎波係数に含まれる経験的定数を調整した結果、一樣斜面における合田(1975)の碎波波高算定図表とよく一致する結果が得られた。
4. 碎波帯内で波高の確率密度分布が徐々に変化する傾向も再現することができた。
5. バー・トラフ地形、Vincent と Briggs (1989) が提示した楕円形浅瀬、および人工リーフのような複雑な地形についても、実験値とかなり合致する計算結果が得られ、こうした複雑地形に対する適用性が確認できた。

参考文献

- 1) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究報告，第14巻，第3号，pp.59-106, 1975.
- 2) 合田良実：屈折効果を利用した縦型人工リーフシステムの特性について，土木学会論文集，No.663/II-53，pp.55-67, 2000.
- 3) 平口博丸，丸山康樹：斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張，第33回海岸工学講演会論文集，pp.114-118, 1986.
- 4) Dally, W.R., Dean, R.G., and Darlymple, R.A.: Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *J. Geophys. Res.*, Vol.90, No.C6, pp.11,917-11,927, 1985.
- 5) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術法の基準・同解説，日本港湾協会，pp.153-154, 1999.
- 6) 権ヒロキミ・合田良実：パー型地形における不規則波の碎波変形について，海岸工学論文集，第42巻，pp.101-105, 1995.
- 7) Kraus, N.C., Smith, J. M., and Sollitt, C.K.: SUPERTANK laboratory data collection project, *Proc. 23rd ICCE, Venice, ASCE*, pp.2191-2204, 1972.
- 8) Larsen, M.: Model for decay of random waves in surf zone, *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, Vol.121, No.1, pp.1-12, 1995.
- 9) Vincent, C.L. and Briggs, M.J.: Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp.269-284, 1989.
- 10) 合田良実，高木泰士：人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の水理特性の比較について，海洋開発論文集，Vol. 13, pp.31-36, 1997.