

現地不規則波浪の浅海変形について

水 口 優*・松 田 仲 次**

1. はじめに

ここ数年、砕波帯を含む沿岸海域における諸現象に対する研究は、国の内外を問わず脚光をあびている。砕波帯近傍では、風浪、うねりなどの入射波浪が沖波という形で外力として与えられる。そして、入射波浪は、海底地形の形状に応じた水深減少に伴って、いわゆる（砕波を含む）浅海変形という過程を経つつ、種々の現象の起動因となっている。例えば、砕波帯外においても、水深の減少と波高の増大があいまって底面流速が増加し、底質の移動を促すことになる。砕波帯内においては底質の移動もさることながら、そこでの急激な波高の減少がいわゆる radiation stress の勾配となって平均水位勾配と平均的な流れ（海浜流）を生むことになる。

本論文の目的は、現地観測結果をもとに、上記の入射波浪の浅海変形特性を明らかにすることにある。以下、まず現地不規則波浪の特性を取り出す手段としての波の定義の問題について論じ、ついでその定義法に基づいて整理した結果について述べる。そして、その結果より1つの浅海変形モデルを組み立て、それによる予測手法を示し、その結果と実測の差異について検討する。

なお、砕波をも含む不規則波の浅海変形については、主なものとしては以下の2つの研究があげられる。合田(1975)は、ゼロ・アップ・クロス法（以下アップ法）により定義された波浪群に対して、選択砕波（個々の波が砕波基準に到達した段階で砕波する）という考え方で、砕波した波は残存分布に応じて分配されるという仮定を用いて、頻度分布および統計的代表値の計算を行っている。そこでは、残存分布に応じて分配されるという考え方が、個々の波の砕波という機構を考慮するという点で不明確と言えよう。また砕波点以深では、基準波（高）に対してのみ浅水変形を考えられているが、砕波帯近くになり水位変動の skewness が増大すると、Rayleigh 分布（ $m=2$ の Weibull 分布）よりは波高の小さい側にピークをもつ m が 2 より小さい Weibull 分布で表される

ことが知られてる〔例えば木村(1979)、水口(1979)〕。

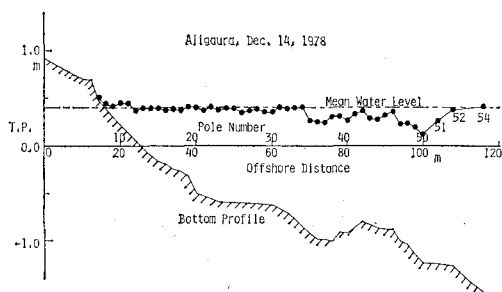
Battjes・Janssen(1978)による研究は、不規則波群のもつエネルギーとその逸散に着目して波高の減衰をとらえるものである。そこでは、エネルギー逸散率として、限界波高以上のもののみが砕波し、かつその砕波モデルとして Bore model を想定することにより、潜在的な最大波高 H_m （近似的には γh 、 h : 水深、 γ : 一様勾配斜面における波高水深比で定数）の2乗と、 H_{rms} （波高の r.m.s. 値）と H_m の比で定まる砕波率の積に比例するものを採用している。波高の頻度分布としては、 $H=H_m$ を上限とした Rayleigh 分布型が仮定されている。結果は、平均的な波群のエネルギー（例えば H_{rms} ）の変化に対しては実験とよい一致を示している。

一方、堀田・水口(1978, 1979)は 16 mm シネカメラによりポールを通過する波浪群を撮映するという方法により、現地波浪の砕波帯内での二次元的な変形について報告している。そこでは、ゼロ・ダウン・クロス法（以下ダウン法）を用いた波別解析法によると、砕波帯の波は進行にともないその波の数を増すと共に、波高頻度分布は時には2山をもつ型となり、上記の2つの扱いでは説明のつかないものとなることが指摘されている。

これに対して、本論文における扱いの特徴は、不規則波中の**主要な波**に対してエネルギー的な考え方を適用することにより、現地不規則波浪の変形特性をその波高の頻度分布形状の変化をも含めて論ずることにある。

2. 現地観測

本論文で用いるデータは、1978年12月14日に茨城県



図—1 海底地形、平均水位およびポール配置

* 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科

** 中央大学学生 理工学部土木工学科（現三井不動産建設 K.K.）

阿字ヶ浦海岸において得られたものである。その観測手法は堀田・水口 (1978, 1979) と全く同様である。フィルム読み取りの際の縮尺は 1/20 で、0.5 mm (すなわち 1 cm 単位) まで読んでいる。コマ取り間隔は 0.2 s で、データ長は 3827 コマ (765.4 s) である。図-1 は、観測線に沿った断面地形およびポール配置地点での平均水位を示したものである。なお、観測時の入射波浪の波向きは、ほとんど汀線に直角であった。

3. 砕波帯近傍における波の定義

与えられた不規則な水位変動からその特性を取り出す手段としてはいくつかある。代表的なものとして、水位分布そのものの確率的な扱い、スペクトル解析によるもの、波別解析法によるものがあげられる。その中では、砕波帯近傍という動力学的に非線型性の強い場において

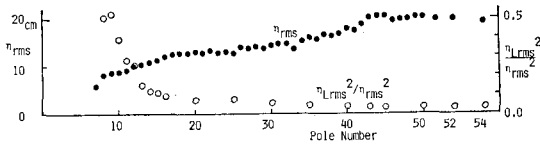


図-2 水位変動の r.m.s. 値および長周期成分の割合

は波別解析法が最適と考えられ、他の手段はそれぞれの特性にあった限定的なものとして有効であろう [水口 (1979)].

図-2 は、水位変動そのものの r.m.s. 値 η_{rms} およびそれに含まれる長周期成分 η_L (20 s 以下は遮断し、25 s 以上は通過する数値フィルターをかけたもの) のエネルギーとしての比率 $\eta_{Lrms}^2 / \eta_{rms}^2$ を示したものである。長波もしくは微小振幅波近似が成立する時は、 η_{rms} はエネルギー密度 E と $E = \rho g \eta_{rms}^2$ の関係にある (ρ : 流体の密度, g : 重力の加速度)。すなわち、図-2 より、Pole 43 付近でエネルギー密度が急激に減少し始め、そこが平均的な砕波点と考えられることや、Pole 30~20 ではエネルギーはほとんど減少せず再成域にあること、Pole 18 以浅で 2 次砕波域となることなどがわかる。

波別解析法において、不規則な水位変動中から波を定義する方法としてはアップ法が用いられることが多い。ところが、砕波帯近傍における個々の波の特性として、後面の立ち上がりより前面の立ち上がりが重要であり、その場合はダウン法を用いることが妥当となる。例えば

波速に有限振幅性を考慮する場合、波圧を考える場合など、取るべき波高としては前面の立ち上がりと考えられる。また、統計的な扱いにおいては、波浪を位相の不規則な正弦波の重ね合せと考える限り両者の差はなく、ダウン法を採用することは十分に一般性を主張し得る。

しかしながら、ダウン法を機械的に適用するには次の 2 つの問題点がある。1 つは沿岸域にほとんど常に存在する長周期の水位変動成分の問題、すなわちゼロ点をどうとるかという問題であり、2 つ目は浅海域の波における 2 次波峰もしくは副次的な波の発生の問題である。

前者は、その長周期成分が場所的、時間的な変動を示す以上、それを除去しなければ入射波浪の特性を取り出すことはできない。なお、その大きさは砕波帯外では全エネルギーの 5% 以下であるが、砕波帯内汀線近くでは 10% を越すようになる [図-2 および水口 (1979)]. 幸いなことに、その長周期成分は数十秒から数分オーダーのものであり、入射波浪の周期に比してかなり長く数値フィルターなどを用いて容易に除去できる。以下のデータは、上記の長周期成分を除去したものである。その結果、解析に用い得るデータ長は、フィルターの精度を 0.02 として 614 sec となる。図-3 は代表的な地点で

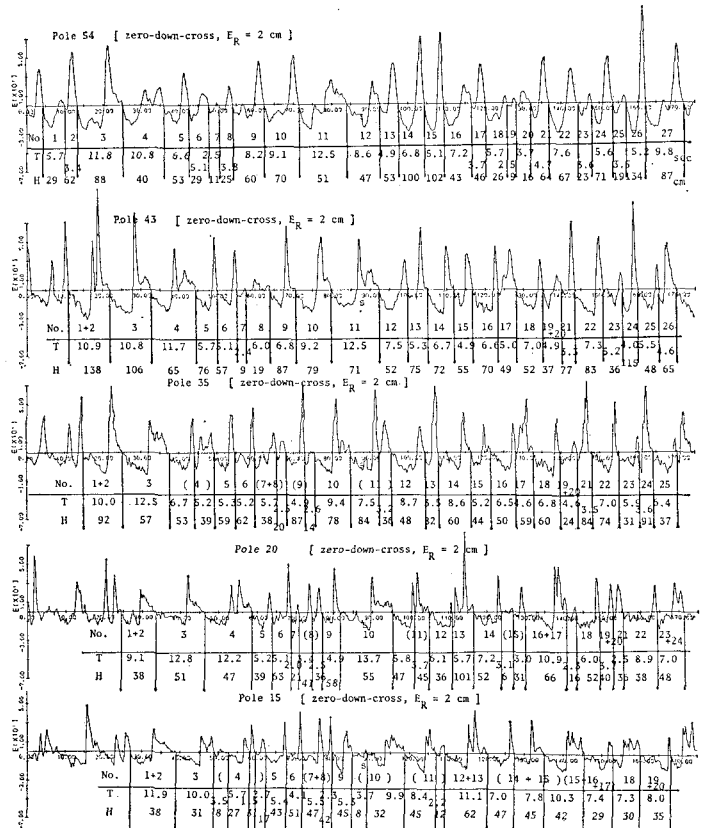


図-3 長周期成分除去後のデータおよびダウン法 ($E_R=2$ cm) による波への分解例

の長周期成分除去後のデータ例である。各点とも観測開始後76秒から175秒間のものである。図中には波別分解例として、読み取り誤差 $E_R=2\text{ cm}$ とした時のダウン法による結果をも示す。砕波帯近傍の波の特徴として、読み取りの際に生じる誤差は主として、波の後面および波底部において、細かくゼロ点を切る傾向にでる。それ故に、その誤差の波の定義に与える影響は一方的なものとなる。そこで、0 点に E_R だけの幅をもたせて、ゼロ・ダウン点を定義するものとした。図中、 T および H は個々の波の周期および波高を表す。

後者は、ダウン法とアップ法における波高および周期の頻度分布の違いとして顕著にあらわれる。図-4(a)は、Pole 54, 50, 43, 35, 25, 15 において $E_R=1\text{ cm}$ (最小読み取り誤差と考えられる値) としてダウン法によって得られる H_{rms} で基準化した波高および平均周期 $\bar{T}$ で基準化した周期の頻度分布であり、図-4(b)は、Pole 54, 43, 35, 15 に対してアップ法を適用したものである。各地点の特徴は、図-2 より Pole 54, 50 は砕波以前の波高増大期、Pole 43 は砕波点、Pole 35 は砕

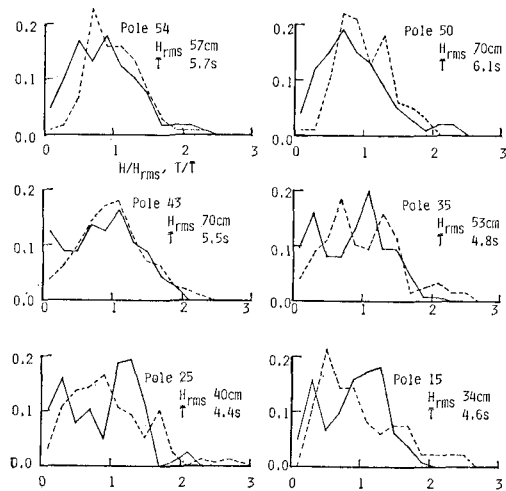


図-4(a) ダウン法 ($E_R=1\text{ cm}$) による頻度分布 (— 波高, --- 周期, 区間幅は共に 0.2 である)

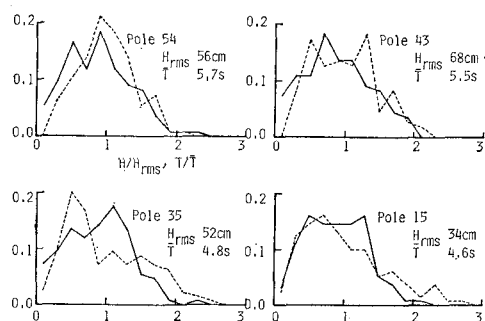


図-4(b) アップ法 ($E_R=1\text{ cm}$) による頻度分布 (— 波高, --- 周期, 区間幅は共に 0.2 である)

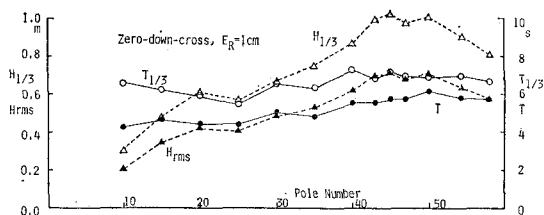


図-5 波としての統計諸量の岸沖方向分布 [ダウン法 ($E_R=1\text{ cm}$)]

波終了やや手前、Pole 25, 20 は再成波域、Pole 15 は 2 次砕波進行域となる。図-5 には、波としての統計諸量の代表的なものの岸沖方向の分布を示す。図-4 および図-5 よりただちに読みとれることは、1 つは砕波帯内での波の数の増加 (すなわち $\bar{T}$ の減少) 傾向であり (波の数はアップ法・ダウン法で同じになる)、2 つめは定義法の差が砕波帯内の波高の頻度分布に与える影響であろう。ダウン法では 2 山型になるのに対し、アップ法で

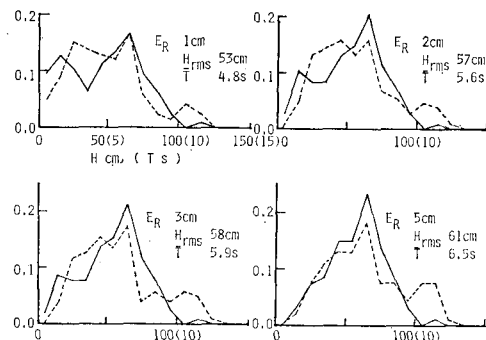


図-6(a) ポール 35 における E_R による頻度分布の変化 (ダウン法, $E_R=4\text{ cm}$ は図-9, 12 参照)

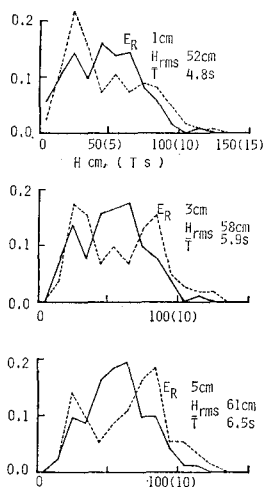


図-6(b) ポール 35 における E_R による頻度分布の変化 (アップ法)

は台形状を示す。この結果、 $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ など、大きいもののみの平均をとる場合はダウン法による量がアップ法によるものより大きめに出ることになる [堀田・水口 (1979)]。その 2 つの特徴は以下のように説明される。砕波後の波において 2 次的な波峰が有意となり、機械的なゼロクロス法により主要な波から 1 個の波として分割されて波の数を増加させる。

その際、ダウン法による分割では各波の前面で波高を定義する結果、波高

の大きいものと小さいものに2極分解することになり、波高（および周期）の頻度分布において図-4に示すような2山型をなすのに、アップ法では、平均的な分割となつて平均値付近の波が増えることになると考えられる。

そこで、Pole 35 において2次的な波峰による新たな波の出現を、便宜的に読み取り誤差 E_R を大きくとることによっておさえるという方法を試みた結果が図-6(a), (b) である。図-7は代表的な地点において同様の方法を適用した時の波の数 N_w の変化図である。当然のことながら、砕波帯内においては読み取り誤差を大きくする効果は著しく、2次波峰の寄与を抑え、波の数 N_w は

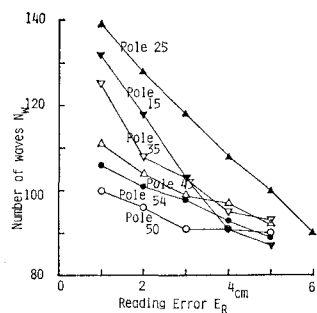


図-7 E_R をかえた時の観測期間中の波の数 N_w の変化 (ダウン法)

減少しながら一定値に近づく傾向を示し、かつ分布におけるダウン法とアップ法の定義による差も小さくなる。そこで読み取り誤差 E_R を適当に選ぶことにより、主要な波を定義し、その主要な波に着目した変形特性について考察する。

4. “主要な波”の変形の特徴

図-3に示す長周期成分を除去したデータにおいて、ポール間で個々の波峰を同定することはむずかしくない。そこで、個々の地点で主要な波を取り出すと考えられる E_R の値を定めて（図-8参照）、最初の数波の周期の変化を追ったものを、図-8に示す。なお各地点での上記の E_R の値は、各地点での長周期成分除去後の（図-3に示す区間の）副次的な波の大きさより判断して定めた。その結果は、図-8に示すように、波の数としてもほぼ同程度となることから、主要な波はすなわち個々の波とみてもよいことがうかがわれる。また、その

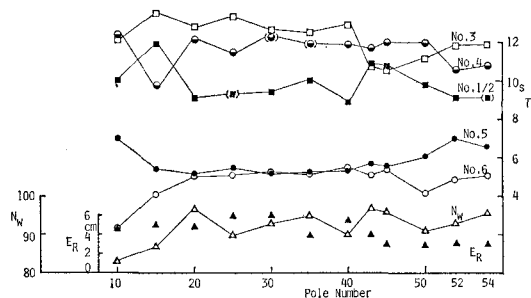


図-8 主要な波の周期変化の例およびその時の E_R , N_w [() 内の点は、波が複数に分裂していることを意味する]

設定値 E_R は、一次砕波点にかけて増加、いったん減少 (Pole 35) した後、再び増加し、2次砕波点 (Pole 20) 以後やや減少する。これは砕波に伴う水面の乱れと共に、非砕波な波の浅水化に伴う波高増大および非線型分散が重要なことも示していよう。図-8より、主要な波の周期がほとんど変化しないことがわかる。これは主要な波が各ポール間で同定可能であるばかりでなく、前後の波に対しても独立性が強く、個々の波を規則波的に扱い得ることを示唆するものと言えよう。砕波帯近傍では、波は十分に長波近似を満足し、波速としては孤立波理論によるもので十分近似されるであろう。そこで、有限振幅性を無視し得れば、各波の位相速度は全て等しくなり、伝播に伴う見かけ上の周期の変化はなくなる。図-8に示される状況はこの事実に対応するものと考えられる。

図-9は図-8に示す E_R に対する各地点での周期の

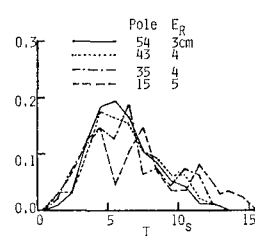


図-9 周期の頻度分布の変化 (区間幅 1s)

頻度分布を示すものであるが、その形状はほぼ相似とはいえず、浅くなるにつれ長い周期のものが少なからず平坦化する傾向（特に Pole 15 に著しい）があり、上記の考え方は厳密には1つの近似的なものであることを示すものといえよう。

5. “主要な波”の波高変化とその算定

主要な波が個々の波としてかなり独立性が強くかつその周期もほとんど変化しないならば、その波を規則的に扱うことができる。その際、まず問題となるのは波高の変化となる。そこで、個々の波に適用可能な浅海変形過程を追うモデルとして次のように考える。

1) 砕波帯外：微小振幅波理論におけるエネルギー保存という考え方を適用してみたが、それでは増大率が小さすぎたため、最大の増大率が出るものとして首藤 (1975) による有限振幅長波に対する波高変化の実用式を簡単化 (定数 $2\sqrt{3}$ を無視した) したものを用いる。

2) 砕波点：Sunamura Horikawa (1974) による砕波限界式を用いる。ただし、この式は一樣勾配斜面に対するものである。

3) 砕波後：水口・辻岡・堀川 (1978) による砕波後の波高変化モデルを用いる。ただし、平均水位の変化を無視した場合のものである [Mizuguchi (1980)]。

このモデルを、最沖側地点 Pole 54 においてダウン法 ($E_R=3$ cm) で定義される全ての波に適用してその変形を追ひ、それを合成することによって頻度分布を含む観測結果と比較検討する。

図-10は、図-8に対応する個々の波の波高変化の

実測値を示すものであり、図-11 は、それに対する上記のモデルによる計算結果である。なお、計算に際しては、図-1 に示す平均水位線と滑らかにした海底地形を用いた。また、砕波条件式および砕波後の波高変化モデル

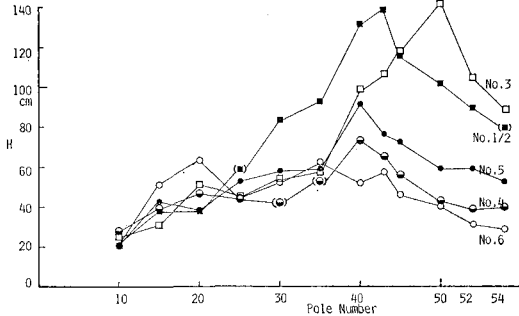


図-10 主要な波の波高変化の例(図-3, 8 参照)

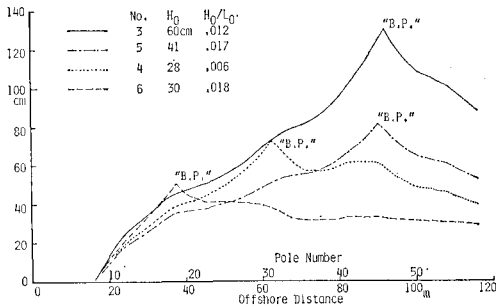


図-11 主要な波の波高変化の計算例(図-10 参照)

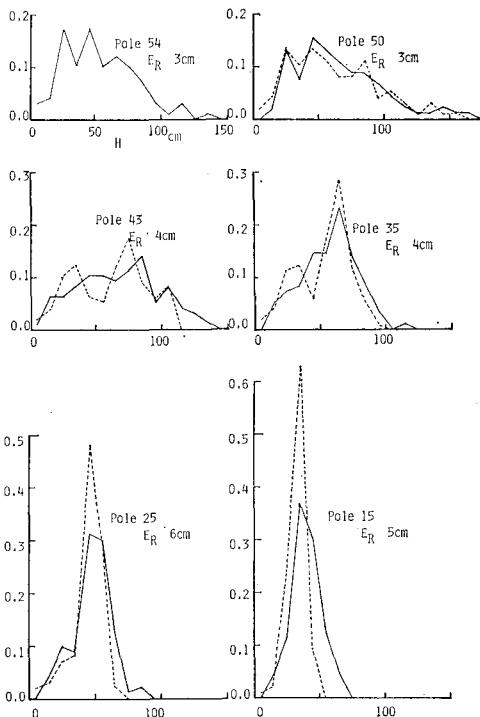


図-12 波高頻度分布の実測(実線)と計算(破線)の比較(区間幅 10 cm)

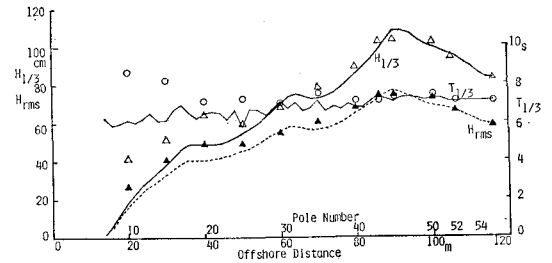


図-13 波としての統計諸量における実測と計算の比較

ルにおける代表的な斜面勾配は、砕波帯外 (Pole 43 以深) の平均勾配 0.03 を用いた。図-10 と 図-11 を比べると、モデルのもつ限界(例えば砕波限界は一樣勾配斜面に対するものであること)やボール読み取りの精度(水表面が気泡におおわれる時に、特におち 10 cm 程度となる)を考慮すると、その一致は良いと言える。

ついで、代表的な地点における波高の頻度分布形状、および統計諸量との比較を見たのが 図-12, 13 である。Pole 20 以沖においては両者の一致はよい。Pole 15, 10 における差異は、モデルにおいて平均水面が海底面と交差する点で波高を 0 とおいている(すなわち run-up を無視している)こと、および実際に主要な波自身が小さくなり副次的な波との区別が難しくなること(図-8 における波の数の減少と対応する)による。

6. おわりに

現地不規則波浪の砕波帯近傍での浅海変形は、適当な手段により**主要な波**を取り出せば、近似的にはその周期はほぼ一定とみなせ、それらを固定周期の規則波として扱って十分である。問題は、主要な波の取り出し方であり、また、主要な波の規則波としての、任意の断面地形に対する変形を追う手段である。前者に対しては、1つの方法として、砕波帯外の適当な(波の周波数分散が無視できるくらい浅く、かつ2次波峰の発生が無視し得る程深い)地点での波の数と同じになる**読み取り誤差**を課すというのが考えられよう。後者に対しては、複雑な断面形状に対する砕波条件の研究がまず第一課題である。

参考文献

- 1) 木村 晃: 土木学会論文報告集, 286号, p. 53, 1979.
- 2) 合田良実: 港技研報告, 14巻, 3号, p. 59, 1965.
- 3) 首藤伸夫: 第21回海講, p. 53, 1974.
- 4) 堀田新太郎・水口 優: 第25回海講, p. 151, 1978.
- 5) 堀田新太郎・水口 優: 第26回海講, p. 152, 1979.
- 6) 水口 優: 第26回海講シンポジウム, p. 23, 1979.
- 7) 水口 優・辻岡和男・堀川清司: 第25回海講, p. 155, 1978.
- 8) Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen: Proc. 16th ICCE, p. 569, 1978.
- 9) Mizuguchi, M.: Proc. 17th ICCE, 1980. (in press)
- 10) Sunamura, T. and K. Horikawa: Proc. 14th ICCE, p. 920, 1974.