

Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性

岩 垣 雄 一*・ 間 瀬 肇**・ 北 直 紀***

1. ま え が き

現在、不規則波を用いて水理実験を行う場合には、Pierson-Moskowitz 型スペクトル、Bretshneider-光易型スペクトル、あるいは構造物の設置対象地点の現地波浪スペクトル、といったある種のスペクトル形をシミュレートした不規則波が一般に用いられている。しかし、スペクトル形状が同じであっても、波がどの程度群をなして来襲するかを示す wave group 特性は必ずしも同じではない。この wave group 特性については従来あまり注目されないで見逃されがちな要因であるが、最近では、これが設計波に対し安全であるはずの海岸・海洋構造物が被災する原因の1つではないかと考えられるようになってきた。例えば、ポルトガルのシネス港の傾斜式防波堤の異型ブロックの崩壊(1978)も、この wave grouping 現象が1つの原因と言われている。

異なった wave group を持つ不規則波を作るには、単にスペクトル形を変えてやればよいわけであるが、風波のスペクトルはある程度普遍的な形を持っているので、同じスペクトル形で異なった wave group 特性を持つような不規則波を作る必要がある。例えば、現地波浪の波高の連の平均長をスペクトルの尖鋭度パラメーターで整理した結果がばらつく¹⁾理由として、統計的変動性の他に、スペクトル形が同じであっても wave group 特性が異なる場合があることがあげられる。

wave grouping 現象は防波堤の法面崩壊以外にも、海洋構造物の長周期動揺、サーフビート、越波による排水処理等の海岸工学上の問題に影響を及ぼすであろうことが合田²⁾によって指摘されている。このような wave group に関連した問題を取り扱った研究は最近始められたばかりである。本研究は、今後、海岸・海洋構造物の安定性に及ぼす wave group の影響などを調べていくために、まず同じスペクトル形を持つが、異なる wave group 特性を有する不規則波のシミュレーション手法を Funk-Mansard²⁾の研究に基づいて確立し、発生波の特

性を調べて、本シミュレーションの特徴を検討し、ついで wave group 特性の異なる2種類の不規則波を用い、一樣斜面上の遡上高に及ぼす wave group の影響について若干の水理実験を行うものである。

2. 不規則波のシミュレーション方法

この方法は波の連なり状態を表わす Smoothed Instantaneous Wave Energy History (略して SIWEH) があるレベル以上(すなわち高波が連なっているところ)では波は主にスペクトルのピーク周波数 f_p で振動し、それ以外では f_p より大きな周波数で振動するようにシミュレートするものである。

上に述べた SIWEH は次式によって定義される²⁾。

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q(\tau) = \begin{cases} 1-|\tau|/T_p, & -T_p \leq \tau \leq T_p \\ 0, & \tau < -T_p, \tau > T_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 T_p はスペクトルのピーク周期、 $\eta(t)$ は水位変動、 τ はタイムラグ、 $Q(\tau)$ はデータウィンドウである。

式(1)は各瞬間の η^2 にフィルターをかけて滑らかにしたもので、平滑化された波エネルギーの時間変化を表わすものである。

この SIWEH はスペクトル $S(f)$ (one-side で定義)と次式に示す関係がある。

$$\bar{E} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} E(t) dt = \int_0^{\infty} S(f) df \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 T_n は波の継続時間、 f は周波数である。

Funk-Mansard²⁾は grouping の程度を表わす指標として、次の Groupiness Factor (略して GF) を提案している。

$$GF = \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \{E(t) - \bar{E}\}^2 dt} / \bar{E} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)は SIWEH の変動係数を表わすものである。

不規則波のシミュレーションを行うにあたり、長さの次元量を波形の標準偏差で、時間の次元量をスペクトルのピーク周期で無次元化しておく。その結果、式(3)を離散化すると次式のようにになる。

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 清水建設

$$\left. \begin{aligned} \bar{E} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(t_i) = \sum_{i=1}^{N/2+1} S(f_i) \Delta f = 1 \\ \Delta f &= 1/(N \Delta t) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

ただし、 Δt はサンプリング間隔である。

以下、シミュレーションの手順を述べる。

- (i) 再現したいスペクトル $S(l)$ ($l=1, N/2+1$) と SIWEH $E_1(i)$ ($i=1, N$) を与える。
- (ii) エネルギースペクトル $S(l)$ より振幅スペクトル $A(l)$ を計算する。

$$\left. \begin{aligned} A(l) &= \sqrt{2S(l)\Delta f}/2, \quad l=1, N/2+1 \\ A(l) &= A(N-l+2), \quad l=N/2+2, N \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

第2式はFFTの折曲げ関係を用いている。

- (iii) 高波が連なっている group 内では、スペクトルのピーク周波数 f_p で振動し、group 外では f_p より大きな周波数を持ち振幅が1である次式の正弦波を導入する。

$$\begin{aligned} x(i) &= \sin \{2\pi f_p(i-1)\Delta t + \theta(i)\}, \quad i=1, N \\ &\dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

式(7)において、 $\theta(i)$ を group 内では一定値となるようにし、また SIWEH が group から出て徐々に小さくなる場合は、となり合う $\theta(i)$ の差が徐々に大きくなるようにする。このような $\theta(i)$ に対しては、原論文を修正して以下のようにする。

まず SIWEH が $\bar{E}_1/2$ 以上を group 内と定義し、次の $U(i)$ を求める。

$$U(i) = \{E_1(i)/B\}^2, \quad i=1, N \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} B &= E_1(i), \quad E_1(i) \geq \bar{E}_1/2 \\ B &= \bar{E}_1/2, \quad E_1(i) < \bar{E}_1/2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

したがって、group 内では $U(i)=1$ となり、それ以外では1未満となる。

次にピーク周波数からのずれ $F(i)$ を次のようにする。

$$F(i) = 5f_p \{1 - U(i)\} \dots\dots\dots (10)$$

最後に $F(i)$ を用いて、 $\theta(i)$ を次式のように求める。

$$\left. \begin{aligned} \theta(1) &= 0 \\ \theta(i) &= \theta(i-1) + 2\pi \Delta t F(i), \quad i=2, N \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

式(10)において、group 内では $F(i)=0$ で、 $\theta(i)$ は一定値となり、 $x(i)$ は f_p で振動する。SIWEH が group から出て小さくなる場合は、式(10)と式(11)からとなり合う $\theta(i)$ の差が大きくなるようになっている。また、SIWEH が i 時点から0となっている場合は、 j 時点では $x(j)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} x(j) &= \sin \{2\pi(6f_p)(j-1)\Delta t + \theta(i-1) \\ &\quad - 2\pi \Delta t(i-2)(5f_p)\} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

これは周波数が $6f_p$ であることを示している。すなわち、式(10)の係数を変化させることにより最大周波数を変化させることができる。

- (iv) 波形の第1次近似 $y_1(i)$ を次式により計算する。

$$y_1(i) = \sqrt{E_1(i)} x(i), \quad i=1, N \dots\dots\dots (13)$$

- (v) $y_1(i)$ のフーリエ変換を行い、振幅スペクトル $Y_1(l)$ ($l=1, N$) と位相スペクトル $\phi_1(l)$ ($l=1, N$) を求める。

- (vi) (v) で得られた $Y_1(l)$ のかわりに (iii) で得られた期待振幅スペクトル $A(l)$ と位相スペクトル $\phi_1(l)$ を用いて、逆フーリエ変換により波形の第2近似 $y_2(i)$ を求める。

- (vii) $y_2(i)$ の SIWEH $E_2(i)$ を計算する。

- (viii) 波形の第3近似 $y_3(i)$ を次式により求める。

$$y_3(i) = \sqrt{E_1(i)/E_2(i)} y_2(i), \quad i=1, N \dots\dots\dots (14)$$

- (viii) $y_3(i)$ のスペクトルおよび SIWEH が与えられた形に収束していれば計算を終え、そうでない時は $y_3(i)$ を $y_1(i)$ として (v) へ戻る。

実際の計算にあたっては、 $N=16384$ 、 $\Delta t=0.04$ とした。期待スペクトルとしては、Pierson-Moskowitz 型スペクトルを与えた。期待 SIWEH は、ここでは間瀬・岩垣²⁾の斜面勾配 1/30 上の不規則波の水深変化に伴う wave grouping の変化を調べた実験結果のうち、沖波波形勾配が 0.0641 の場合で計測水深が 50cm, 14cm, 12cm, 10cm, 8cm, 6cm, 4cm の波形記録より得られる SIWEH を用いた。これらをそれぞれ Case 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 とする。こうすることで、grouping の大きいものから小さいものまで種々の SIWEH を与えることができる。必要ならば現地波浪記録の SIWEH を用いることも、また SIWEH のスペクトル形を仮定してシミュレートすることもできる²⁾。

3. シミュレーション結果および発生波の特性

計算の繰返し回数による収束の程度を検討したところ、4回も繰返しせば良好な結果が得られることがわかった。表—1 は数値シミュレーションより得られた波高と周期の代表量、ある波高の設定値を越える波高の連の

表—1 数値シミュレーション結果

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
H_{max}	6.180	5.382	5.483	5.833	5.987	6.588	7.817
$H_{1/10}$	4.786	4.428	4.276	4.242	4.341	4.747	4.968
$H_{1/3}$	3.768	3.784	3.708	3.656	3.666	3.783	3.763
$\bar{H}$	2.272	2.496	2.519	2.601	2.612	2.230	2.389
T_{max}	0.960	1.000	0.520	1.080	0.840	0.760	0.800
$T_{1/10}$	0.913	0.881	0.900	0.889	0.840	0.888	0.914
$T_{1/3}$	0.868	0.901	0.893	0.882	0.859	0.900	0.888
$\bar{T}$	0.685	0.736	0.734	0.754	0.750	0.733	0.700
$\overline{H(H_{1/3})}$	1.316	1.286	1.206	1.190	1.172	1.186	1.344
$\overline{H(H_{1/3})}$	9.510	8.745	8.657	8.570	8.657	9.082	10.233
$\overline{H(\bar{H})}$	2.195	2.509	2.500	2.304	2.024	2.010	1.954
$\overline{H(\bar{H})}$	4.974	5.311	5.028	4.423	4.100	4.577	4.769
GF	0.744	0.525	0.470	0.406	0.419	0.556	0.702
m	1.88	2.40	2.38	2.97	2.73	2.33	2.04

(波高は波形の標準偏差で周期はスペクトルのピーク周期で無次元化してある)

平均長 $\bar{T}$ と高波の平均くり返し長さ $\bar{I}$, GF および波高の頻度分布に Weibull 分布をあてはめた時の母数の値 m をまとめたものである。なお、波はゼロアップクロス法で定義した。無次元有義波高は約 3.7, 無次元有義波周期は約 0.9 となっている。

図-1 はそれぞれ Case 1 と 2 の振幅スペクトル (太線

が期待スペクトル), SIWEH (太線が期待 SIWEH) および波形である。これらの図は 4 回繰り返し計算を行った後の結果である。他のケースも調べてみると, GF が小さい場合には, シミュレーション波の振幅スペクトルは期待振幅スペクトルに比べて, ピーク周波数で尖っており, その比は最大 1.11 倍となっていた。また, SIWEH

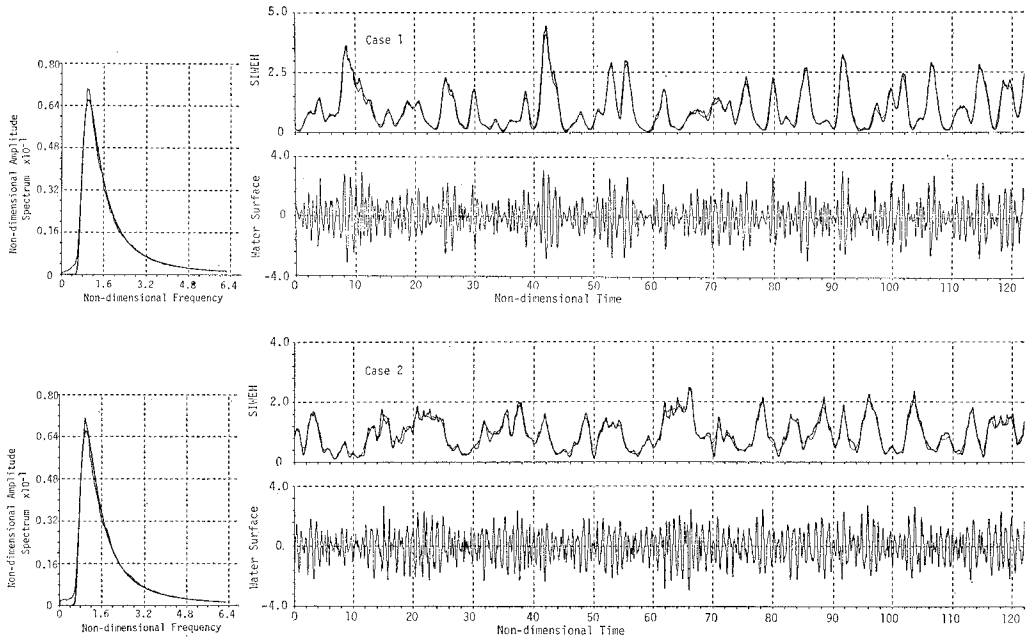


図-1 振幅スペクトル, SIWEH および波形

はその変動の激しいところで若干の差がみられた。

図-2 はそれぞれ Case 1 と 2 の水位の出現確率をプロットしたものであり, 図中の曲線は Gauss 分布の理論曲線である。この図から水位の出現確率はほぼ Gauss 分布で近似されるが, Case 2 に若干その傾向が現われているように, GF が小さいケースでは水位が 0 付近の出現率が小さくなる。GF=0 という極端な場合, 水位変動はほぼ正弦波で表わされる。この水位の出現確率はおおよそ図-3 のようになるので, GF の小さいケースで

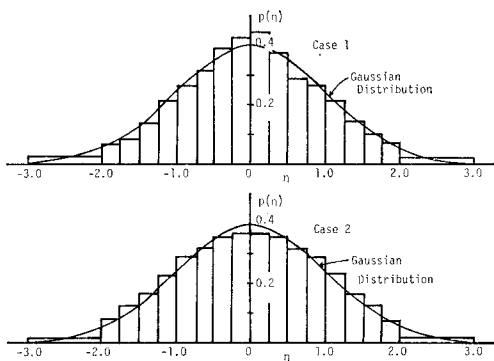


図-2 水位の出現確率

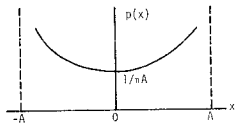


図-3 正弦波 $x=A \sin \omega t$ の確率密度関数 $p(x)$

水位 0 付近の出現率が小さくなっていると思われる。

図-4 はそれぞれ Case 1 と 2 の波高の頻度分布を示したものである。図中の実線は Rayleigh 分布の理論曲線, 破

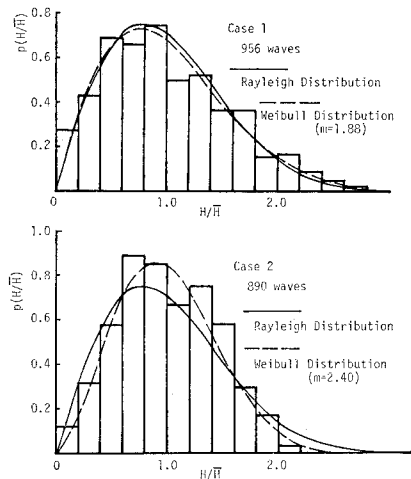


図-4 波高の頻度分布

線は Weibull 分布⁴⁾の理論曲線であり、その母数 m の値が図中に示してある。Weibull 分布の母数が 2 のとき Rayleigh 分布となる。他のケースも同様に調べてみると、GF が小さいほど平均波高付近において出現率が Rayleigh 分布より大きくなり、Weibull 分布の母数の値が大きくなる(表-1 参照)。GF が 0 に近づくと、波高出現率は平均波高部分に集中することになる。Case 2, 3, 6 の Weibull 分布の母数は約 2.35 であり、これは御坊海域で得られた台風時波浪の波の減衰期の波高分布から得られる Weibull 分布の母数の値と良く似ている⁵⁾。Weibull 分布の母数の値が 2 より大きくなるということは、Rayleigh 分布は高波高部分を実測結果より過大評価するという Forristall⁶⁾ や Nolte ら⁷⁾の指摘と一致するものである。

図-5 (a) は SIWEH がその平均値以上となる group

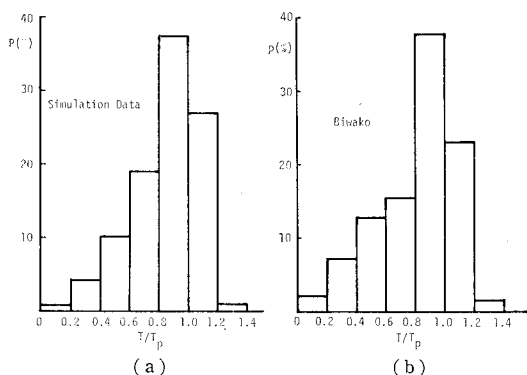


図-5 高波の周期分布

内の周期の分布を全ケースまとめて整理したものである。式(7)で group 内ではシミュレーション波がピーク周波数 f_p を持つようにしたが、計算を繰り返すと図-5 (a) のような分布を示すようになる。図-5 (b) は 1975 年 10 月 5 日に得られた琵琶湖における波浪観測記録⁸⁾を用いて、図-5 (a) と同様に整理したものである。ただし、スペクトルのピーク周期は $T_p = T_{1/3}/0.94$ を用いている。図-5 の (a) と (b) はほとんど一致しており、シミュレーション波の group 内の周期分布は現地波浪のそれと同じようになっているのがわかる。なお、普通の周期分布は、高波成分をどこまで取るかによって異なり、 T^2 -Rayleigh 分布と比べて平坦になったり尖ったりする。

4. 異なる Wave Group を持つ不規則波を用いた遡上実験

ここでは、一様斜面上の不規則波の遡上高を例に上げ、wave group の影響についての水理実験を行った。

用いる不規則波発生機の造波特性は、規則波の場合と同様に、Biesel-Squet の理論がほぼ適用できることが

既に報告されており⁹⁾、あらかじめ期待スペクトルに Biesel-Squet の理論に基づいて歪みを与えておき、この振幅スペクトルと 3. で得られた Case 1 と 2 の波形より得られる位相スペクトルを逆フーリエ変換した後、D-A 変換して不規則波の入力信号を作製した。

実験は京都大学工学部土木系地下実験室の長さ 27 m, 幅 50 cm, 深さ 70 cm の両面ガラス張り水槽で行った。用いた不規則波は上に述べた Case 1 と Case 2 (grouping の大きいものと小さいもの)のそれぞれについて、ピーク周波数を 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 Hz と変化させた。斜面勾配は 1/10 の一様勾配とし、一様水深部の水深は 45 cm とした。遡上波の定義法は岩田ら¹⁰⁾と同様である。

従来の不規則波の遡上実験の整理法を調べてみると、遡上高をある遡上高の代表量で無次元化した遡上高の分布といった形で整理され、規則波のように沖での波の代表量で整理されたものはあまり見当たらない。そこで、ここでは実験結果を整理するにあたっては、沖波有義波高で無次元化した相対遡上高を沖波波形勾配との関係で整理する。

図-6 は今回の実験で得られた平均相対遡上高と 2%

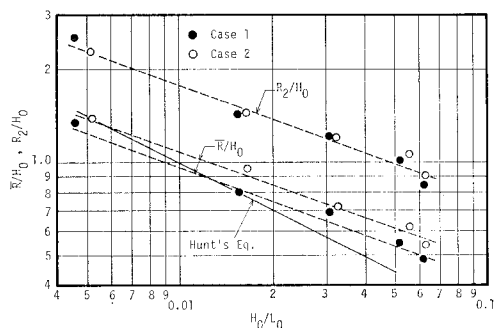


図-6 相対遡上高と沖波波形勾配の関係

相対遡上高(超過確率が 2% の遡上高)の結果である。この図から、規則波の場合と同様に、沖波波形勾配が大きくなるにつれ相対遡上高が小さくなるのがわかる。なお、参考のために Hunt の実験式を図中に示してあるが、実験結果を表わす直線の勾配は波形勾配の $-1/2$ 乗で示される Hunt の実験式によるものより小さく、値そのものは平均遡上高の結果の方に近い。平均相対遡上高についてみると、Case 2 (grouping の小さい場合)の方が 1 割強 Case 1 より大きい。一方、2% 相対遡上高については、両者の差はほとんど見られない。このことは遡上高の頻度分布が Case 1 と Case 2 で異なることを示しており、平均遡上高で無次元化した遡上高分布は Case 1 の方が Case 2 に比べ長い裾を持つことを示す。

5. あとがき

本研究は、海岸・海洋構造物の安定性に及ぼす wave

group の影響などを調べていくための段階として、まず同じスペクトルを持つが、異なる wave group 特性を有する不規則波のシミュレーションを Funk-Mansard の研究に基づいて行こうとともに、シミュレーション結果より得られる wave group の異なる 2 種類の不規則波を用い、1/10 勾配の斜面上の遡上高に及ぼす wave group の影響を調べる若干の実験を行ったものである。その主な結論は次のとおりである。

- (1) 本シミュレーションは繰り返し計算を行って不規則波を求めるが、4 回繰り返せばそのスペクトルと SIWEH は、期待スペクトルおよび期待 SIWEH に収束する。
- (2) 水位の出現確率はほぼ Gauss 分布で近似されるが、Groupiness Factor が小さい場合には、水位 0 付近の出現率が Gauss 分布より小さくなる。
- (3) 波高分布に Weibull 分布をあてはめると、Groupiness Factor が小さいほど、その母数の値は大きくなる。
- (4) group 内に含まれる周期の分布特性を、数値シミュレーション結果と琵琶湖における波浪データについて比較したところ、両者は良く一致する。
- (5) 平均相対遡上高についてみると、grouping の小さい不規則波の方が遡上高が大きいが、2% 相対遡上高についてみると差はなくなる。

今後、多くの遡上高および打ち上げ高の実験を行って、wave group の影響を明らかにするとともに、水位の長周期変動と遡上波や SIWEH との関係、砕波後の波と遡上波との関係等について検討していくつもりである。また、現地波浪の wave group の特性や他の海岸・

海洋構造物の安定性に及ぼす wave group の影響を検討していきたい。

最後に、本研究を行うにあたり種々御助言を頂いた京都大学工学部酒井哲郎助教授並びに鳥取大学工学部木村晃助教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 合田良実: 波の連りの統計的性質について、港湾技術研究所報告, 第 15 巻第 3 号, pp. 3~19, 1976.
- 2) Funk, E. R. and Mansard, E. P. D.: On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, Hydraulics Laboratory Report LTR-HY-66, National Research Council of Canada, 1979.
- 3) 間瀬 肇・岩垣雄一: 水深減少にともなう Wave Grouping (波群) の変化に関する研究, 第 36 回土木学会年次学術講演会, pp. 769~770, 1981.
- 4) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波浪の周期の確率特性に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 295~300, 1975.
- 5) 間瀬 肇・岩垣雄一・福原拓平: 波の発達・減衰に伴う Wave Grouping の変化, 第 37 回土木学会年次学術講演会, 1982 (発表予定).
- 6) Forristall, G. Z.: On the statistical distribution of wave heights in a storm, J. Geophys. Res., Vol. 83, No. C5, May, pp. 2353~2358, 1978.
- 7) Nolte, K. G. and F. H. Hsu: Statistics of larger waves in a sea state, Proc. ASCE, Vol. 108, No. WW4, pp. 389~404, 1979.
- 8) 岩垣雄一・土屋義人 他: 琵琶湖における波浪観測について, 京大防災研究所年報, 第 19 号, B-2, pp. 361~379, 1976.
- 9) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波発生機による現地波浪のシミュレーションシステム, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 231~235, 1974.
- 10) 岩田好一郎・樫木 亨・信田 亘: 緩斜面における不規則波の遡上高さとは遡上周期, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 330~334, 1981.