

数値シミュレーションによる波浪の 標準スペクトルと統計的性質

合 田 良 実*

1. ま え が き

不規則な海の波の研究では、スペクトル解析および個別波の統計量の解析の両面からのアプローチが必要である。砕波を含む非線型性の強い問題では、後者が主流とさえいえる。不規則波の波高・周期はゼロクロス法で定義されるのが標準なため、それらの確率分布を理論的に厳密に求めることは困難である。最近 Tayfun¹⁾ は波高分布のレーリー型からのずれをスペクトルの帯域幅の影響によるものとして解析し、Forristall²⁾ は実測データがこれによって説明できると報じている。しかし、この理論にしてもスペクトル幅が比較的狭いことを前提にしたものである。さらに、波高・周期の結合分布にしても包括的な理論は確立されていない。

従来から著者はいろいろな目的で不規則波形の数値シミュレーションを活用してきたが³⁾⁻⁵⁾、今回は特にスペクトル形状が波高、周期等の統計量に及ぼす影響について検討した。なお、本報は本年9月の第22回 IAHR 総会における「波浪解析・造波セミナー」で発表した論文⁶⁾に加筆したものであることをお断わりする。

2. 数値シミュレーション手法について

(1) 成分波数の影響

与えられた波浪スペクトルに対応する不規則波形の作成は、基本的には多数の成分波の線型重ね合わせによる。これには逆 FFT 法と三角関数合成法が使われる。前者は波形のデータ個数を $N=2^n$ とし、 2^{n-1} 個の各 $\sin$, $\cos$ 成分を使うもので、各周波数は等間隔である。波形は 2^n の周期で繰り返すけれども、演算時間が短くて済む。後者は比較的少数の成分波を使い、各周波数を不等間隔にとって波形の繰り返しが起こきないようにするものである。データ長の制限がないが、演算時間は前者よりも長い。磯部・古市⁷⁾は表面波形と流速2成分を $N=1024$ 個で合成する場合、三角関数合成法は逆 FFT 法の約 30 倍の計算時間を要したと報じている。ただし、著者が1次元の表面波形について三角関数の階差公式を用い、成分波数を 100 として計算した例では 2.4 倍であ

った。なお、プログラムのメモリーサイズは逆 FFT 法の方が約 3 倍 ($N=8192$ の場合) 必要であった。

今回は大量の波形合成を行う必要から逆 FFT 法を用いたが、三角関数合成法は水理実験の造波信号作成その他に使われることが多いので、成分波数による差異について調べてみた。最も明瞭に現われるのは、連続する波高間の相関係数 r_{HH} であり、成分波数が不足すると r_{HH} として過小な値が出る。また、波高の統計量や波形の尖鋭度 β_2 もある程度の影響を受ける。図-1 は β_2 の結果であり、凡例の M は成分波数である。水理実験の場合は各成分波の周波数がその周りに広がる現象があるので、数値実験ほど厳密に考えなくともよい。しかし、成分波は少なくとも 100 個、できれば 200 個以上が望ましい。

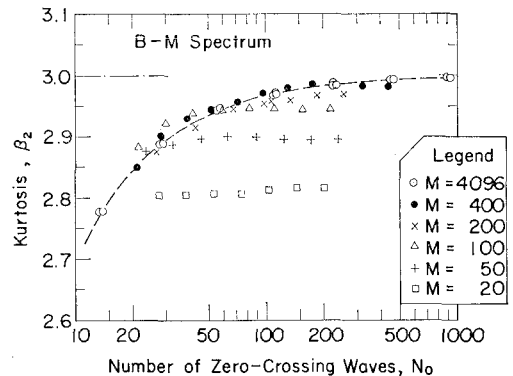


図-1 波形の尖鋭度に及ぼす成分波数の影響

(2) 数値シミュレーションの条件

対象とする波浪諸元としては1地点の表面波形に限定し、周波数スペクトルとして Wallops 型⁸⁾と JONSWAP 型⁹⁾(関数形は後述の式(2), (5))の3パラメータ型をとり上げ、その形状を各8通りに変化させた。シミュレーション条件は次のとおりである。

周波数範囲 : $f/f_p=0.6\sim 6.0$

サンプリング時間間隔 : $\Delta t=T_p/12$

データ点数 : $N=4096 (=341.3T_p)$

各周波数の $\sin$, $\cos$ 成分の振幅は、スペクトルから計算される期待値の周りに正規分布するものとし、擬似正

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所

規分布乱数を使って与えた。

シミュレーションは各スペクトル形状に対し 2000 回ずつ行った。得られた波形データはファイルに一時記憶させ、各波形の先頭から 512, 1024, 2048 個の長さのデータを取り出し、4096 個の原データと併せ、それぞれ統計解析して種々の統計量の平均値と標準偏差を求めた。この操作は 1000 回ずつ 2 回に分けて行い、その結果の算術平均として最終結果をとりまとめた。

なお、著者が先に発表したもの⁵⁾と比べて今回はデータ長および繰返し回数が多いので、数値としての信頼度は上である。

3. 波浪統計量の平均値

表一、2 は、各種統計量の平均値を示したものである。記号は波形の rms 値を η_{rms} で表し、周期を $T_{1/3}$ 等と略記した以外は IAHR の勧告に準拠している。波形のひずみ度 $\sqrt{\beta_1}$ と尖鋭度 β_2 は線型不規則波ではそれぞれ 0 および 3 となるので省略してある。ここに示した平均値はデータ長 4096 個に対するもので、短い波形のときはここに示した平均値よりも若干小さくなる統計量が多い。スペクトル形状パラメータ m , γ に伴う統計量の変化が一部で逆転しているが、これはシミュレーション回数がまだ不足であることによると思われる。

(1) H_{max} および η_{max} の統計量

表中で * 印を付したのは式 (1) のレーリー分布の期待値に対する比率をデータ長 512~4096 個に対する平均値として求めたものである。Forristall¹⁰⁾は波高分布を Weibull 分布を使って経験的に表現したときの H_{max} の期待値を導き、レーリー分布に基づく期待値に対する比率が波数の増加につれて減少する結果を示している。しかし、今回のデータではそうした傾向は出ていない。

$$E[x_{max}] = \frac{1}{a} (\ln N_0)^{1/2} + \frac{C}{2a (\ln N_0)^{1/2}} - \frac{\pi^2 + C^2}{48a (\ln N_0)^{3/2}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 N_0 は波数であり

$$x_{max} = H_{max}/H_*$$

$$a = \begin{cases} 1/\sqrt{8} : H_* = \eta_{rms} \\ 1.46 : H_* = H_{1/3} \end{cases}$$

C: オイラー定数 (0.5772...)

なお η_{max} は式で $H_{max}/2$ に等しいとして求めた。

今回の結果では η_{max}/η_{rms} がレーリー分布の理論値に近いのに対し、 H_{max}/η_{rms} は最大 10% 以上小さい。このため、線型な波形であるにもかかわらず、 η_{max}/H_{max}

表一 Wallops 型スペクトルにおける統計量の平均値 ($f_{max}=6f_p$)

統計量	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=8$	$m=10$	$m=14$	$m=20$	レーリー分布
$[\eta_{max}/\eta_{rms}]^*$	0.992*	0.998*	1.000*	1.000*	1.000*	0.998*	0.992*	0.981*	1.000*
$[H_{max}/\eta_{rms}]^*$	0.893*	0.911*	0.925*	0.935*	0.949*	0.956*	0.962*	0.961*	1.000*
η_{max}/H_{max}	0.560	0.551	0.544*	0.538	0.528	0.522	0.515	0.511	0.500
$H_{1/10}/\eta_{rms}$	4.658	4.734	4.781	4.818	4.877	4.912	4.971	5.007	5.690
$H_{1/3}/\eta_{rms}$	3.736	3.800	3.830	3.848	3.874	3.895	3.924	3.948	4.004
$\bar{H}/\eta_{rms}$	2.359	2.412	2.448	2.470	2.488	2.495	2.501	2.504	2.507
σ_H/η_{rms}	1.201	1.218	1.218	1.217	1.221	1.230	1.246	1.261	1.309
$[H_{max}/H_{1/3}]^*$	0.958*	0.961*	0.967*	0.974*	0.981*	0.984*	0.983*	0.976*	1.000*
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.247	1.246	1.248	1.251	1.259	1.263	1.267	1.268	1.271
$\bar{H}/H_{1/3}$	0.631	0.635	0.639	0.642	0.641	0.638	0.635	0.635	0.626
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.584	1.576	1.565	1.558	1.557	1.561	1.569	1.577	1.597
$T_{1/10}/T_p$	0.824	0.866	0.889	0.899	0.915	0.927	0.943	0.959	1.000
$T_{1/3}/T_p$	0.782	0.848	0.883	0.902	0.923	0.934	0.947	0.960	1.000
$\bar{T}/T_p$	0.579	0.671	0.740	0.791	0.851	0.885	0.921	0.946	1.000
σ_T/T_p	0.252	0.255	0.246	0.234	0.213	0.198	0.176	0.155	0.000
$T_{max}/T_{1/3}$	1.066	1.009	0.987	0.980	0.980	0.985	0.990	0.994	1.000
$T_{1/10}/T_{1/3}$	1.055	1.021	1.004	0.997	0.992	0.993	0.996	0.998	1.000
$T_{1/3}/\bar{T}$	1.350	1.265	1.192	1.142	1.084	1.055	1.028	1.015	1.000
r_{HT}	0.711	0.663	0.595	0.525	0.413	0.336	0.242	0.173	0.000
r_{HH}	0.172	0.241	0.293	0.333	0.395	0.445	0.525	0.611	1.000

* 式 (1) の理論値に対する比率

表二 JONSWAP 型スペクトルにおける統計量の平均値 ($f_{max}=6f_p$)

統計量	$\gamma=1$	$\gamma=1.5$	$\gamma=2$	$\gamma=3.3$	$\gamma=5$	$\gamma=7$	$\gamma=10$	$\gamma=14$	$\gamma=20$
$[\eta_{max}/\eta_{rms}]^*$	1.000*	1.000*	0.995*	0.996*	0.993*	0.983*	0.981*	0.969*	0.964*
$[H_{max}/\eta_{rms}]^*$	0.925*	0.929*	0.927*	0.935*	0.938*	0.934*	0.937*	0.931*	0.930*
η_{max}/H_{max}	0.544	0.541	0.539	0.534	0.530	0.528	0.527	0.521	0.518
$H_{1/10}/\eta_{rms}$	4.781	4.801	4.813	4.849	4.877	4.894	4.921	4.938	4.959
$H_{1/3}/\eta_{rms}$	3.830	3.842	3.850	3.866	3.884	3.895	3.910	3.920	3.933
$\bar{H}/\eta_{rms}$	2.448	2.452	2.455	2.461	2.469	2.476	2.482	2.490	2.495
σ_H/η_{rms}	1.219	1.226	1.231	1.242	1.249	1.253	1.259	1.261	1.266
$[H_{max}/H_{1/3}]^*$	0.967*	0.968*	0.965*	0.969*	0.968*	0.962*	0.962*	0.954*	0.950*
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.248	1.250	1.250	1.253	1.256	1.256	1.259	1.260	1.261
$\bar{H}/H_{1/3}$	0.639	0.638	0.638	0.636	0.636	0.636	0.635	0.635	0.635
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.565	1.567	1.569	1.573	1.574	1.573	1.576	1.575	1.577
$T_{1/10}/T_p$	0.886	0.891	0.914	0.933	0.946	0.954	0.962	0.968	0.973
$T_{1/3}/T_p$	0.883	0.901	0.914	0.934	0.948	0.957	0.965	0.970	0.975
$\bar{T}/T_p$	0.740	0.760	0.775	0.804	0.830	0.851	0.873	0.892	0.911
σ_T/T_p	0.246	0.247	0.247	0.244	0.238	0.238	0.220	0.208	0.195
$T_{max}/T_{1/3}$	0.987	0.989	0.989	0.987	0.987	0.987	0.988	0.988	0.989
$T_{1/10}/T_{1/3}$	1.004	1.003	1.001	0.997	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998
$T_{1/3}/\bar{T}$	1.192	1.186	1.180	1.162	1.143	1.125	1.106	1.088	1.071
r_{HT}	0.595	0.596	0.596	0.587	0.571	0.553	0.527	0.497	0.459
r_{HH}	0.293	0.334	0.369	0.446	0.509	0.561	0.620	0.671	0.719

* 式 (1) の理論値に対する比率

の比は 50% を超える。これは、波の山と谷の振幅が等しくないことによると推察され、Tayfun¹⁾ の解析を裏付ける。なお、スペクトルのピークが非常に鋭くなる (m あるいは γ の増大) と $\eta_{\max}/\eta_{\text{rms}}$ の比が 1 から遠く去かるのは、波高間の相関係数 r_{HH} も増大するため理論で前提としている波高の独立性が失なわれるためである。最近、Naess¹¹⁾ はこの現象を理論的に検討している。

(2) 波高および波高比の統計量

スペクトルのピークがなだらかになる (m あるいは γ の減少) につれて、これらの統計量はレーリー分布の値よりも次第に小さくなる。現地観測で $H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ の比が 3.8 程度となるのは $m=4\sim 5$ の Wallops 型に相当し、実際のスペクトル形状に照らしても順当である。

(3) 周期および周期比の統計量

スペクトルのピークがなだらかになるにつれて、 $T_{1/3}$ 等の代表周期はピーク周期 T_p から次第にずれて小さな値となる。この減少率は $\bar{T}$ が最も大きく、このため $T_{1/3}/\bar{T}$ の比は次第に増大する。なお、今回は $f_{\max}=6f_p$ に制限したので、 $m=3$ のケースなどはこの影響で $f_{\max}$ が十分に大きいときよりもやや大き目の値になっている。

(4) 相関係数

スペクトルのピークが鋭くなるにつれ、波高間の相関係数 r_{HH} は増大し、波高と周期の間の相関係数 r_{HT} は減少する。後者は Wallops 型スペクトルにおいて顕著であり、JONSWAP 型では減少が極めてゆるやかである。

4. 周波数スペクトルの標準形

造波水路で不規則波を発生させるとき、発生スペクトルが目標準とずれることが少なくない。その主な原因はピーク周期 T_p と有義波周期 $T_{1/3}$ の関係が当初の設定値と一致しないことにある。そこで、表—1, 2 で記載した $T_{1/3}/T_p$, $H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ 等の平均値をスペクトル形状パラメータ m あるいは γ の経験的関数として表すことにし、試行錯誤によって次の結果を得た。

標準形 I: 修正 Wallops 型スペクトル

$$S(f)=\beta_W H_{1/3}^3 T_p^{1-m} f^{-m} \exp \left[-\frac{m}{4} (T_p f)^{-4} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta_W = \frac{0.06238 m^{(m-1)/4}}{4^{(m-5)/4} \Gamma[m-1]/4} \times [1+0.7458(m+2)^{-1.057}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$T_p = \begin{cases} T_{1/3}/[1-0.283(m-1.5)^{-0.684}] & \dots\dots\dots (4) \\ \bar{T}/[1-1.295(m-0.5)^{-1.072}] \end{cases}$$

標準形 II: 修正 JONSWAP 型スペクトル

$$S(f)=\beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right]$$

$$\times \gamma \exp [-(T_p f-1)^2/2\sigma^2] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_J = \frac{0.06238}{0.230+0.0336\gamma-0.185(1.9+\gamma)^{-1}} \times [1.094-0.01915 \ln \gamma] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$T_p = \begin{cases} T_{1/3}/[1-0.132(\gamma+0.2)^{-0.559}] & \dots\dots\dots (7) \\ \bar{T}/[1-0.532(\gamma+2.5)^{-0.559}] \end{cases}$$

式 (3), (4) の β_W , β_J の表式のうち角括弧の部分 $H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ のレーリー分布理論値 4.004 からのずれに対する修正項である。 β_J の分数式の部分は山口¹²⁾ による経験式で置き換えることが可能である。

紙数の関係でここには示していないが、港湾技術研究所での不規則実験波のスペクトルに式 (2) をあてはめたところ、ブレットシュナイダー・光易型よりもピークの位置など適合性が良いことが確かめられている。ただし、大波高の場合は非線型効果のために $H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ の比が 4.0 を超えることが多く、そのような場合には提案式は実験値よりも大きな推定値を与える。

式 (2) で $m=5$, 式 (5) で $\gamma=1$ とすると、従来からの 2 パラメータ型スペクトルとなる。係数値の末尾を微調整すると、両者は次の標準形に帰着する。

標準形 III: 修正ブレットシュナイダー・光易型

$$S(f)=0.205 H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp [-0.75(T_{1/3} f)^{-4}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

これは原スペクトルに比べてピーク周波数が約 8% 低く、ピークのスペクトル密度が約 18% 高く、全体として低周波数側にずれた形になっている。

原スペクトルでは $T_p=1.05T_{1/3}$ の関係を用いているが、これは光易¹³⁾ が博多湾における観測地や風波の実験値を参照して仮定したものである。現地では低周波数領域にもエネルギーが存在し、また無次元フェッチの小さい領域でのデータであってスペクトルのピークが鋭かったのではないかと推測される。少なくとも、水理実験の目標スペクトルとしては式 (8) の方が適切と思われる。

5. 波浪統計量の変動性

数値実験で得られた統計量の標準偏差はそのほとんどが波数 N_0 の $-1/2$ 乗に比例する。そこで、次式をあてはめてその比例係数 α を求め、データ長 512~4096 個に対する値の平均値を表—3, 4 のように算出した。

$$\sigma(x)=\alpha N_0^{-1/2}, \quad \text{C.V.}[x]=\alpha N_0^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

表中の S.D. は標準偏差, C.V. は変異係数 (標準偏差/平均値) を対象としている。

(1) 波形の統計量の標準偏差

ひずみ度 $\sqrt{\beta_1}$ と前傾度 β_3 (著者⁵⁾ が提案した波形の時間軸方向の非対称性パラメータ) は、スペクトルのピークが鋭くなるにつれて変動性が小さくなる。逆に、尖鋭度 β_2 の変動性は増大する。ただし、 m あるいは γ が大きいときは β_2 の標準偏差は $N_0^{-1/3}$ に比例する傾向

がや見られる。

(2) 最高波高の変異係数

レーリー分布では次式で与えられる。

$$\text{C.V.} [H_{\max}] = \frac{\pi}{2\sqrt{6} \ln N_0} \left(1 + \frac{C}{2 \ln N_0} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

表—3, 4では数値実験による変異係数と上式による値と

の比を*印を付して示している。 $m=3$ では理論値よりも15%小さくなる。

(3) 波高および波高比の変異係数

波高の統計量の変異係数は、スペクトルのピークが鋭くなるにつれて増大する。これは理論的にも予測される場所である^{(14),(15)}。波高比については変化の度合いがやや小さい。中でも $H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ の比は変異係数が最小であり、 $H_{1/3}$ が統計的に安定した

表—3 Wallops 型スペクトルにおける統計的変動性の比例係数 α

統計量 (変数)	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=8$	$m=10$	$m=14$	$m=20$	カルデラ港
$\sqrt{\beta_1}$ (S.D.)	0.93	0.82	0.72	0.62	0.44	0.32	0.16	0.08	0.95
β_2 (S.D.)	2.29	2.44	2.57	2.69	2.89	3.05	3.30	3.49	3.52
β_3 (S.D.)	0.88	0.82	0.77	0.71	0.55	0.40	0.21	0.09	1.16
$[H_{\max}]^*$ (C.V.)	0.85*	0.88*	0.90*	0.92*	0.93*	0.95*	0.97*	1.01*	0.98*
η_{rms} (C.V.)	0.49	0.53	0.55	0.58	0.62	0.65	0.71	0.77	0.75
$H_{1/10}$ (C.V.)	0.64	0.67	0.70	0.72	0.77	0.81	0.87	0.94	0.79
$H_{1/3}$ (C.V.)	0.57	0.58	0.60	0.61	0.65	0.69	0.74	0.80	0.82
$\bar{H}$ (C.V.)	0.61	0.63	0.64	0.65	0.67	0.70	0.75	0.81	0.97
σ_H (C.V.)	0.74	0.77	0.79	0.83	0.89	0.93	1.01	1.09	1.03
$H_{1/10}/\eta_{\text{rms}}$ (C.V.)	0.37	0.38	0.40	0.41	0.43	0.45	0.49	0.53	0.49
$H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ (C.V.)	0.22	0.19	0.17	0.16	0.16	0.17	0.18	0.20	0.18
$\bar{H}/\eta_{\text{rms}}$ (C.V.)	0.33	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.24	0.24	0.42
$H_{1/10}/H_{1/3}$ (C.V.)	0.34	0.35	0.36	0.36	0.38	0.39	0.42	0.44	0.41
$H_{1/3}/\bar{H}$ (C.V.)	0.30	0.32	0.32	0.32	0.33	0.34	0.36	0.38	0.50
$T_{1/10}$ (C.V.)	0.64	0.54	0.48	0.43	0.36	0.31	0.26	0.22	0.21
$T_{1/3}$ (C.V.)	0.49	0.40	0.35	0.31	0.27	0.24	0.20	0.17	0.19
$\bar{T}$ (C.V.)	0.51	0.44	0.40	0.36	0.31	0.28	0.25	0.22	0.44
σ_T (C.V.)	0.66	0.63	0.65	0.69	0.72	0.74	0.81	0.88	1.05
$T_{1/10}/T_{1/3}$ (C.V.)	0.57	0.48	0.43	0.28	0.32	0.28	0.22	0.18	0.18
$T_{1/3}/\bar{T}$ (C.V.)	0.40	0.38	0.37	0.34	0.31	0.28	0.25	0.21	0.51

* 式 (10) の理論値に対する比率, S.D.: 標準偏差, C.V.: 変異係数

表—4 JONSWAP 型スペクトルにおける統計的変動性の比例係数 α

統計量 (変数)	$r=1.5$	$r=2$	$r=3.3$	$r=5$	$r=7$	$r=10$	$r=14$	$r=20$	カルデラ港
$\sqrt{\beta_1}$ (S.D.)	0.69	0.66	0.62	0.57	0.52	0.47	0.42	0.38	0.95
β_2 (S.D.)	2.62	2.61	2.77	2.95	2.96	3.27	3.36	3.68	3.52
β_3 (S.D.)	0.77	0.76	0.75	0.72	0.71	0.68	0.64	0.60	1.16
$[H_{\max}]^*$ (C.V.)	0.91*	0.90*	0.94*	0.96*	0.98*	1.02*	1.04*	1.09*	0.98*
η_{rms} (C.V.)	0.58	0.61	0.68	0.74	0.89	0.87	0.94	1.00	0.75
$H_{1/10}$ (C.V.)	0.73	0.75	0.83	0.89	0.95	1.03	1.09	1.17	0.79
$H_{1/3}$ (C.V.)	0.62	0.65	0.72	0.78	0.84	0.91	0.97	1.04	0.82
$\bar{H}$ (C.V.)	0.67	0.71	0.77	0.83	0.89	0.96	1.03	1.08	0.97
σ_H (C.V.)	0.82	0.84	0.92	0.99	1.04	1.13	1.21	1.31	1.03
$H_{1/10}/\eta_{\text{rms}}$ (C.V.)	0.40	0.39	0.42	0.44	0.46	0.50	0.53	0.57	0.49
$H_{1/3}/\eta_{\text{rms}}$ (C.V.)	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.18
$\bar{H}/\eta_{\text{rms}}$ (C.V.)	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34	0.36	0.36	0.42
$H_{1/10}/H_{1/3}$ (C.V.)	0.36	0.36	0.39	0.41	0.41	0.44	0.46	0.49	0.41
$H_{1/3}/\bar{H}$ (C.V.)	0.32	0.33	0.35	0.37	0.39	0.41	0.44	0.46	0.50
$T_{1/10}$ (C.V.)	0.44	0.40	0.35	0.30	0.26	0.24	0.20	0.19	0.21
$T_{1/3}$ (C.V.)	0.32	0.30	0.26	0.23	0.20	0.17	0.15	0.14	0.19
$\bar{T}$ (C.V.)	0.40	0.41	0.40	0.39	0.39	0.37	0.35	0.32	0.44
σ_T (C.V.)	0.64	0.63	0.66	0.72	0.82	0.97	1.14	1.32	1.05
$T_{1/10}/T_{1/3}$ (C.V.)	0.40	0.37	0.32	0.29	0.26	0.22	0.20	0.17	0.18
$T_{1/3}/\bar{T}$ (C.V.)	0.36	0.37	0.36	0.36	0.36	0.35	0.34	0.32	0.51

* 式 (10) の理論値に対する比率, S.D.: 標準偏差, C.V.: 変異係数

り、 $H_{1/3}$ が統計的に安定したパラメータであることを裏付けている。

(4) 周期および周期比の変異係数

これらはスペクトルのピークが鋭くなるにつれて減少する。例外は波群中の周期の標準偏差 σ_T である。 $T_{\max}$ については理論値がないので、数値実験の結果を抜き出して 図—2, 3 に示した。波数が増加しても変異係数があまり減少しないのが特徴的である。

(5) 相関係数の標準偏差

相関係数は一般に $(1-r^2)/n$ の分散を持つ⁽¹⁶⁾。ただし、 r は母集団の相関係数、 n はサンプル数である。 r_{HH} に対しては $n = N_0 - 1$ 、 r_{HT} では $n = N_0$ である。数値実験の結果はこの理論値ではほぼ表されるものの、やや大き目の傾向が見られた。

(6) 現地データの統計的変動性との比較

表—3, 4の最右欄は、著者が先に解析したコスタリカ国カルデラ港のうねりのデータ⁽¹⁷⁾から求めた波浪統計量の変動性の比例係数である。データは1981年5月21日16時03分から同月22日05時51分までの連続約14時間の波形記録を30分ずつ27データに分割して解析したものである。時間の経過に伴う波高・周期等の絶対値の減少は回帰直線のあてはめによって補正し、波数としては $N_0=110 \sim 129$ 波の平均値118.6波を用いた。数値実験のデータと比べてみると、カルデラ港のデータ

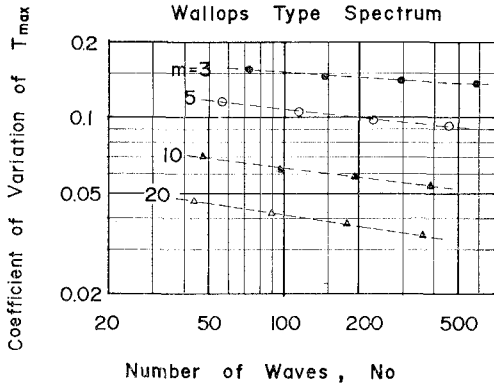


図-2 Wallops 型スペクトルの T_{max} の変異係数

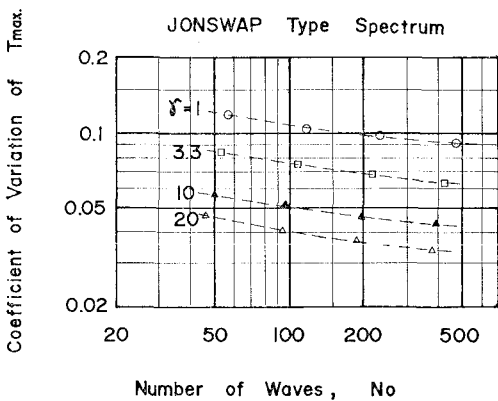


図-3 JONSWAP 型スペクトルの T_{max} の変異係数

は大勢として $m=14\sim 20$ の Wallops 型, $\gamma=7\sim 10$ の JONSWAP 型スペクトルの波に対応する。 $\sqrt{\beta_1}$ および β_3 の変動性が大きいのは、非線型性の強いデータであるためと思われる。カルデラ港のスペクトル自体は $\gamma=8\sim 9$ の JONSWAP 型に近いので、この波浪統計量のデータは今回の数値実験の妥当性を裏付けるものである。また、泉宮ほか¹⁸⁾の No. 0 の観測データもスペクトルのピークが鋭いところから、大勢としては一致している。

なお、カルデラ港のデータでは r_{HT} の平均値が 0.62 と大きい。これはうねりに局地的風波が重畳したためとも推測されるが、そうした風波は常に存在すると考えられるので、その他の各統計量の平均値も併せて考えると、極めて遠距離を伝播してきたうねりであっても、スペクトルとしては $\gamma=7\sim 10$ 程度の JONSWAP 型であってはめることが可能である。

6. あとがき

数値シミュレーション波形を使った統計解析はどちらかといえば単調な作業であり、理論のような新しい局面展開は期待しにくい。また、擬似不規則波の制約があり(2次干渉項までは取り入れ可能)、現地観測データの迫力には及ばない。しかし、種々の条件下で大量の統計計算を行って理論の不備を補い、波浪統計量の基準値を整備する役割は大きい。本報は一見、無味乾燥な数値の羅列のようであるが、現地データの統計解析に対する基準値、あるいは今後の波浪統計理論の展開への基礎資料として役立てて頂くことを願う次第である。

なお、波浪観測で得られた $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ 等の数値はややもすると確固不動の値として受け取られがちである。しかし、本報で述べた統計的変動性のデータを玩味して頂ければ分るように、20 分程度の記録から求めた値はそのときの海況を真に代表しているものではない。真値は観測値の上下いずれか 数~10% の範囲に存在するといえなことを改めて指摘しておきたい。

参考文献

- 1) Tayfun, M. A.: Ocean Eng., 10-2, pp. 107~118, 1983.
- 2) Forristall, G. Z.: J.G.R., 89-C6, pp. 10547~10552, 1984.
- 3) Goda, Y.: 港湾技研報告, 9-3, pp. 3~57, 1970.
- 4) Goda, Y.: 港湾技研報告, 16-2, pp. 3~41, 1977.
- 5) 合田良実: 港湾技研報告, 24-4, pp. 65~102, 1985.
- 6) Goda, Y.: Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins, Lausanne, 1987.
- 7) 磯部雅彦・古市耕輔: 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 159~163, 1986.
- 8) Huang, N. E. et al.: J.F.M., 112, pp. 203~224, 1981.
- 9) Hasselmann, K. et al.: Deutsche Hydr. Zeit, Reihe A (8°), 1973.
- 10) Forristall, G. Z.: J.G.R., 83-C5, pp. 2353~2358, 1978.
- 11) Naess, A.: Ocean Eng., 12-3, pp. 221~234, 1985.
- 12) 山口正隆: 土木学会論文集, 345/II-1, pp. 149~152, 1984.
- 13) 光易 恒: 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 1~7, 1970.
- 14) Tucker, M. J.: British J. Applied Physics, 8, pp. 137~142, Apr. 1957.
- 15) Cavanié, A. G.: Proc. Int. Conf. Sea Climatology, Édition Technip, Paris, pp. 73~88, 1979.
- 16) Kendall, M. G. and A. Stuart: The Advanced Theory of Statistics, Vol. 1 (3rd ed.), p. 236, 1969.
- 17) Goda, Y.: 港湾技研報告, 22-1, pp. 3~41, 1983.
- 18) 泉宮尊司ほか: 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 129~133, 1986.