

重回帰分析に基づく波浪の統計的特性の検討

山 口 正 隆*

1. 緒 言

従来より観測結果の解析に基づいて波浪の統計的特性を検討した研究は非常に多く、理論的研究の進展と相まってその特性がかなり明確にされてきている。しかしながら、波浪の統計的特性に関する研究は1地点での観測結果の解析に基づき、たとえば各種平均波高比や周期比などの関係を検討したものが大部分であって、種々の海域および気象条件のもとでの観測資料を包括的に解析することにより波浪の統計的特性を支配する内在因子を検討した系統的研究例は限られている¹⁾。

そこで、本研究では周波数スペクトルがあらかじめ与えられるという立場から波浪の統計的特性が周波数スペクトルの特性を代表する諸因子によりどのように規定されるかを重回帰分析法の適用によって検討するとともに、連長に対する木村の理論の適用性²⁾や波浪統計量の統計的変動性を考察する。この場合、解析に用いる資料は、数十mから数千kmの広範囲な吹送距離のもとで取得された多数の深海性波浪の観測結果および高精度の数値シミュレーション結果である。

2. 観測結果およびシミュレーション結果の解析方法

2.1 観測結果の解析方法

本研究においては、種々の海域および気象条件のもとでの観測資料に基づいて波浪の統計的特性を検討することを目的としているので、著者³⁾が過去に扱った琵琶湖彦根愛西湖岸(水深4m, 最大吹送距離約20km)での172個の資料に加えて、同湖岸での31個、琵琶湖長浜湖岸(水深2m, 最大吹送距離約1km)での12個、神戸港(水深16m, 最大吹送距離約50km)での22個、日本海沿岸の浜田(水深50m, 最大吹送距離約1000km)での24個、太平洋岸の高知沖(水深120m, 最大吹送距離1000km以上)での111個および風洞水槽(水深40~60cm, 最大吹送距離約40m)での12個の深海性波浪資料を新たに平均波法およびスペクトル法で解析

し、合計384個の波浪資料を得た。観測波浪は数十mから数千kmの吹送距離のもとで季節風および台風により生成されており、たとえば、有義波高は約5cmから11mの範囲にある。また、スペクトル解析の結果によれば、384個の資料のうち、神戸港、高知沖および浜田での合計10個を除き、スペクトルは単峯性である。

2.2 シミュレーション結果の解析方法

著者³⁾は、合成波法を用いてJONSWAP型スペクトルの線型数値シミュレーションを行い、シミュレーション結果と琵琶湖での波浪観測結果の比較から波浪統計量の特性を考察した。本研究では、波浪統計量に及ぼすシミュレーション法の影響を検討するため、同様の条件および解析方法のもとにデジタルフィルタ法⁴⁾によって数値シミュレーションを行い、175個の資料を得た。

3. 波浪統計量の統計解析

3.1 スペクトルパラメータ(説明変数)の選択

波浪統計量に対する重回帰分析にあたり説明変数を選択しなければならないが、本研究における解析では、スペクトルが与えられる場合の波浪統計量の特性を検討するという立場から、合田¹⁾によるspectral peakedness Q_p 、無次元サンプリング間隔 $\Delta t/T_p$ (T_p : スペクトルのピーク周期)およびスペクトルの高周波側の勾配 ξ の3つのスペクトルパラメータを用いることにする。これらのパラメータを選択したのは、spectral peakednessがその定義式から明らかなように、エネルギーが卓越するピーク周波数付近の形状を、一方、 ξ がスペクトルの高周波側の形状を、また $\Delta t/T_p$ が分解能を規定すると考えたからである。後出の表-1によると、観測結果における Q_p および ξ の平均値はそれぞれ2.49および4.66であるから、JONSWAP スペクトルほどではないにしてもPierson-Moskowitz型スペクトルよりかなり尖った形を示し、高周波側の減衰率もPhillipsの-5乗則と鳥羽の-4乗則の中間に位置することがわかる。また、観測結果におけるこれらの平均値および標準偏差はシミュレーション結果によるものと比較的良好に対応するが、シミュレーション結果における $\Delta t/T_p$ の範囲が広く、しかもほぼ一様に分布するので、シミュレイショ

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

ン結果より導かれた波浪統計量の $\Delta t/T_p$ への依存性が観測結果に比べて強くなる。

3.2 波浪統計量に対する重回帰分析結果

さて、重回帰モデルとして線型式および対数線型式などが用いられているが、波浪統計量がスペクトルパラメータに対して非線型の挙動を示すこともあることを考慮に入れて、対数線型式を採用した。そして、重回帰分析より得られる偏相関係数および寄与率の大小により波浪統計量のスペクトルパラメータへの依存性を判定した結果つぎのことが見出された。(a) 観測結果およびシミュレーション結果はスペクトルパラメータへの同様な依存性を示すが、後者の場合の相関係数が大きい。(b) 波浪統計量に及ぼす数値シミュレーション法の影響はほとんどない。(c) 有義波高より小さい波高に対する各種平均波高比および波高分布は $\Delta t/T_p$ への相対的に弱い依存性を、一方有義波周期以下の各種平均周期比、周期分布および各種平均周期とスペクトルによる代表周期との比はおおむね $\Delta t/T_p$ および Q_p への比較的強い依存性を示す。(d) 有義波高および平均波高に対する平均連長 $\bar{j}(H_{1/3})$ および $\bar{j}(H_m)$ と相隣る波高間の自己相関関数

r_{H1} は Q_p により規定される。(e) 有義波高と水位変動の標準偏差の比 $H_{1/3}/\sigma$ は観測結果の場合 Q_p に若干依存するが、シミュレーション結果の場合、 $\Delta t/T_p$ および Q_p に強く依存する。(f) スペクトルの1次および2次積率で定義されるスペクトル幅パラメータ ν_s と波高と周期の相関係数 ρ は $\Delta t/T_p$ に、スペクトルの2次および4次積率で定義されるスペクトル幅パラメータ ϵ_s は $\Delta t/T_p$ のみならず、 ξ に依存する。(g) 3つのスペクトルパラメータに独立な波浪統計量は高波高部の波高比および周期比とスペクトルの0次および2次積率で定義される平均周期と波形解析から求められる平均周期との比 T_{m02}/T_m である。

つぎに、各種統計量の平均値および標準偏差について表示したのが表-1であり、各段の第1行が観測結果を、第2行および第3行がそれぞれ合成波法およびデジタルフィルタ法によるシミュレーション結果を表わす。

この表からつぎのことが言えよう。(a) 波浪統計量の平均値および標準偏差に及ぼすシミュレーション法の系統的な相違はほとんど見出されない。(b) 観測結果とシミュレーション結果による各種統計量の平均値は波数に關係する $H_{max}/H_{1/3}$ を除いて相互に良く似ているが、標準偏差は当然観測結果が大きい。(c) 波高分布に Weibull 分布をあてはめて推定した形状母数 m の平均値は観測結果では近似的に2であり、各種波高比も Rayleigh 分布から得られる値に近い。また、 $H_{1/3}/\sigma$ も観測結果で3.9であり、従来から明らかにされているように理論値の4.0より若干小さい。一方、シミュレーション結果におけるこれらの値は観測結果より小さく評価されている。(d) 観測結果およびシミュレーション結果のいずれについても平均的に、

$$T_{max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx 1.18 T_m \approx 1.14 T_{m01} \\ \approx 1.23 T_{m02} \approx 0.92 T_p$$

が成立する。ここに、 T_{m01} はスペクトルの0次および1次積率で定義される平均周期である。また、周期分布に Weibull 分布をあてはめて推定した形状母数 n の平

表-1 波浪統計量の平均値および標準偏差

$H_{max}/H_{1/3}$	1.607 (0.169) 1.996 (0.142) 1.901 (0.073)	T_{max}/T_m	0.949 (0.028) 0.957 (0.016) 0.958 (0.017)
$H_{1/3}/H_{1/3}$	1.254 (0.041) 1.247 (0.010) 1.245 (0.006)	$T_{1/3}/T_{m01}$	1.137 (0.039) 1.138 (0.034) 1.143 (0.034)
$H_{1/3}/H_m$	1.591 (0.055) 1.565 (0.025) 1.560 (0.021)	$T_{1/3}/T_{m02}$	1.247 (0.068) 1.223 (0.076) 1.228 (0.073)
m	2.027 (0.196) 2.112 (0.112) 2.131 (0.095)	γ_{H1}	0.386 (0.111) 0.376 (0.089) 0.379 (0.093)
$H_{1/3}/\sigma$	3.902 (0.084) 3.769 (0.103) 3.749 (0.110)	$\bar{j}(H_{1/3})$	1.519 (0.248) 1.504 (0.140) 1.501 (0.155)
$T_{max}/T_{1/3}$	0.993 (0.086) 1.007 (0.073) 0.991 (0.061)	$\bar{j}(H_m)$	2.634 (0.405) 2.576 (0.236) 2.591 (0.235)
$T_{1/3}/T_{1/3}$	1.003 (0.033) 1.005 (0.012) 1.002 (0.009)	ν_s	0.444 (0.072) 0.380 (0.103) 0.378 (0.099)
$T_{1/3}/T_m$	1.182 (0.068) 1.170 (0.070) 1.176 (0.066)	ϵ_s	0.833 (0.094) 0.689 (0.150) 0.685 (0.148)
n	3.587 (0.726) 3.732 (0.666) 3.665 (0.599)	$\sqrt{\beta_1}$	0.120 (0.110) 0.001 (0.011) 0.014 (0.008)
ρ	0.582 (0.120) 0.553 (0.106) 0.556 (0.104)	β_2	3.075 (0.250) 2.983 (0.065) 2.955 (0.029)
$T_{1/3}/T_p$	0.917 (0.051) 0.923 (0.035) 0.919 (0.036)	Q_p	2.490 (0.497) 2.517 (0.680) 2.439 (0.640)
T_m/T_p	0.779 (0.077) 0.793 (0.072) 0.785 (0.069)	ξ	4.655 (0.542) 4.643 (0.407) 4.643 (0.407)
T_{m01}/T_m	1.040 (0.040) 1.027 (0.039) 1.028 (0.036)	$\Delta t/T_p$	0.063 (0.030) 0.134 (0.071) 0.136 (0.072)

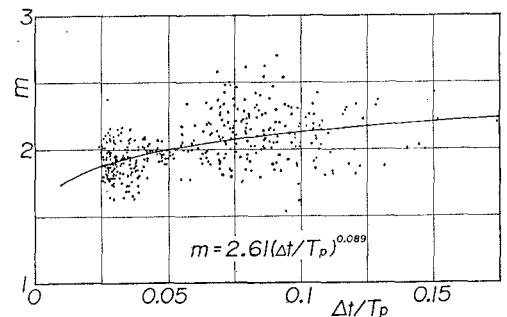


図-1 m と $\Delta t/T_p$ との関係

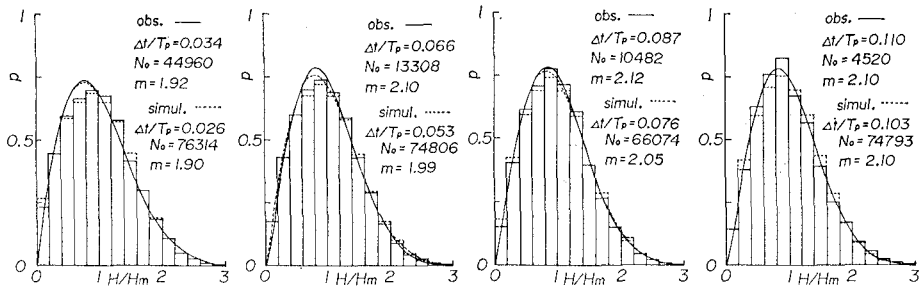


図-2 波高のひん度分布

均値は $n=3.6$ であり, $n=4$ の T^2 -Rayleigh 分布より周期分布はやや平坦である。(e) 平均連長 $\overline{j(H_{1/3})}$ および $\overline{j(H_m)}$ の平均値はそれぞれ約 1.5 および 2.6 であるから, 波高の前後の相関を無視して得られる理論値 1.16 および 1.837 より大きい。(f) 観測結果の skewness および kurtosis, $\sqrt{\beta_1}$ および β_2 の平均値はそれぞれ 0.12 および 3.08 であり, 水位変動分布はかなり正規分布に近く, シミュレーション結果におけるそれらとの差も小さい。

3.3 波高の統計的特性

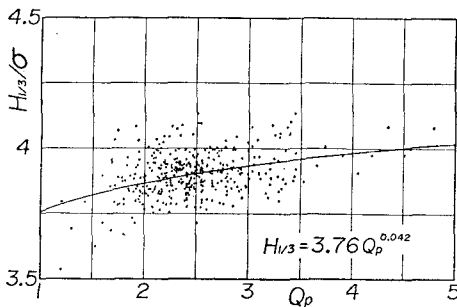
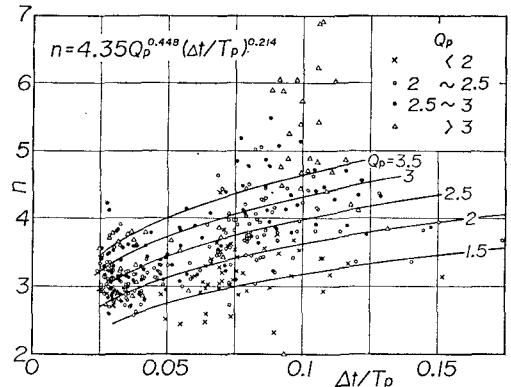
図-1 は m と $\Delta t/T_p$ の関係および単回帰曲線を観測結果について示したものであり, 観測結果のばらつきが大きいけれども, m は $\Delta t/T_p$ とともに若干増加することがわかる。 $\Delta t/T_p$ の増加は小波高短周期の波を波浪資料から除去することを意味するから, サンプル間隔が粗くなれば, 波高分布は Rayleigh 分布 ($m=2$) より尖った分布になり, たとえば, $H_{1/3}/H_m$ も $\Delta t/T_p$ とともに漸減する傾向をもつ。この点をより明確にするため, $\Delta t/T_p$ の小区間別に観測結果および合成波法によるシミュレーション結果における波高の頻度分布を示したのが図-2 であり, 図中には, $\Delta t/T_p$ の各区間に対する m の平均値から計算された Weibull 分布も図示されている。これらの図によると, 波高分布は $\Delta t/T_p$ の増加とともに Rayleigh 分布より平坦な分布からより尖

った分布に変化し, $\Delta t/T_p$ が大きい場合には Weibull 分布との対応も良好であるが, $\Delta t/T_p$ が小さい場合には波高分布は必ずしも Weibull 分布で近似されない。

つぎに, 図-3 は $H_{1/3}/\sigma$ と Q_p の関係を示したものである。前述したように, 観測結果の解析によれば, $H_{1/3}/\sigma$ の平均値は理論から得られる 4.0 より 3.8 程度の値をとるとされているけれども, $H_{1/3}/\sigma$ は Q_p とともに若干増加し, 理論値に漸近する傾向がある。なお, シミュレーション結果によれば, $H_{1/3}/\sigma$ は Q_p のみならず $\Delta t/T_p$ にも依存し, $\Delta t/T_p$ が増加するほど減少する傾向を示す。

3.4 周期の統計的特性

図-4 は観測結果に対する n と $\Delta t/T_p$ の関係を Q_p をパラメータとして図示したものであり, 資料のばらつきが大きいけれども, n は $\Delta t/T_p$ および Q_p が大きいほど大きい。すなわち, $\Delta t/T_p$ の増大は小波高短周期の波を除去することを, また Q_p の増大はスペクトルの尖鋭化を意味するので, 両者のパラメータの増大とともに, 周期分布は尖がることになる。その結果, たとえば $T_{1/3}/T_m$ は $\Delta t/T_p$ および Q_p の増大とともに減少する。そしてこの傾向はシミュレーション結果においてより明確に見出される。

図-3 $H_{1/3}/\sigma$ と Q_p との関係図-4 n と $\Delta t/T_p$ および Q_p との関係

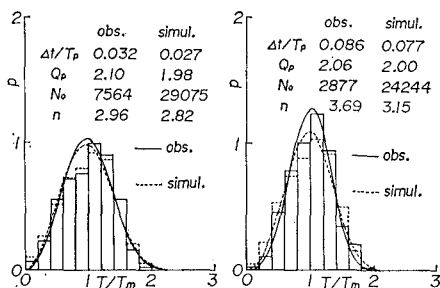


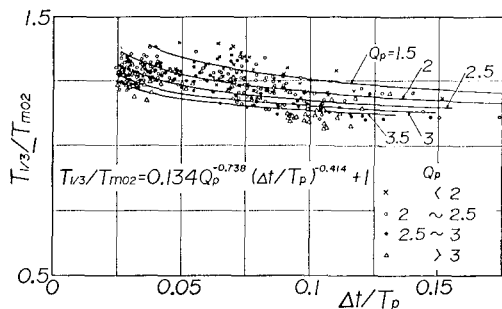
図-5 周期のひん度分布

また、図-5 は観測結果および合成波法によるシミュレーション結果から得られた周期分布を $\Delta t/T_p$ および Q_p の小区間ごとに整理し、Weibull 分布と比較した二例を示したものである。これらの図によれば、確かに周期分布は $\Delta t/T_p$ および Q_p が増加するほど尖がるが、波高分布の場合ほど Weibull 分布によってよく近似されないし、 $\Delta t/T_p$ が大きい場合には観測結果のばらつきが大きいため、観測結果とシミュレーション結果の差も増加する。

つぎに、 Q_p をパラメータとして $T_{1/3}/T_{m02}$ と $\Delta t/T_p$ の関係を観測結果について示したのが図-6 であり、 $T_{1/3}/T_{m02}$ は観測結果およびシミュレーション結果のいずれにおいても $\Delta t/T_p$ および Q_p の増加とともに減少する。また $T_{1/3}/T_{m01}$ も同様の傾向を示すが、 $T_{1/3}/T_{m02}$ の減少率がより大きい。 T_{m02} および T_{m01} はスペクトル法に基づく波浪推算から直接算出される平均周期であるので、これらの関係はスペクトルから導かれた平均周期を有義波周期に変換するために役立つであろう。

3.5 波高の連長の統計的特性

波高の連長特性は、近年活発に研究が進められた結果^{1),2)}、直接的には相隣る波高間の自己相関関数、あるいは間接的にはスペクトルの尖鋭度により規定されることが理論的にも経験的にも明らかにされている。図-7 は平均連長 $\bar{j}(H_{1/3})$ と Q_p の関係を示したものであり、

図-6 $T_{1/3}/T_{m02}$ と $\Delta t/T_p$ および Q との関係

$\bar{j}(H_{1/3})$ は Q_p とともに単調増大する傾向がある。しかし、観測結果においては、1つの資料あたりの連長データが少ないので、平均連長の統計的変動がかなり大きい。つぎに、波高間の相関を考慮した木村²⁾の理論との比較を行う。図-8 は観測結果およびシミュレーション結果から得られた $\bar{j}(H_{1/3})$ および $\bar{j}(H_m)$ と γ_{H1} の関係を木村の理論と比較したものであり、図-7 に示したように観測結果は非常に大きなばらつきを伴うので、 γ_{H1} の小区間ごとに求めた平均値と標準偏差によって表わされている。この図によると、木村の理論は観測結果およびシミュレーション結果の変化傾向をよく説明するが、より詳細には、理論は $\bar{j}(H_{1/3})$ をやや過大に、 $\bar{j}(H_m)$ をやや過小に評価する傾向がある。つぎに、観測結果から得られた連長 $\bar{j}(H_{1/3})$ および $\bar{j}(H_m)$ の確率分布を γ_{H1} の各小区間ごとに分類し、木村の理論と比較したのが図-9 であり、いずれの場合についても理論は観測結果とよく一致する。また、紙数の都合上図を省略したが、理論は波数が十分多く、したがって資料の統計的変動が小さいシミュレーション結果と一層よく一致する。

4. 波浪統計量の統計的変動性

ここではスペクトルパラメータとの相関が認められなかった平均波高比および平均周期比の統計的変動性を調べる。図-10 は観測資料を波数 N_0 の小区間ごとに分

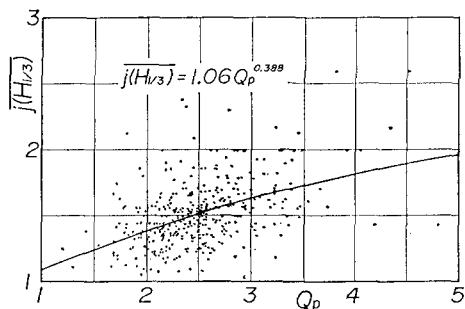
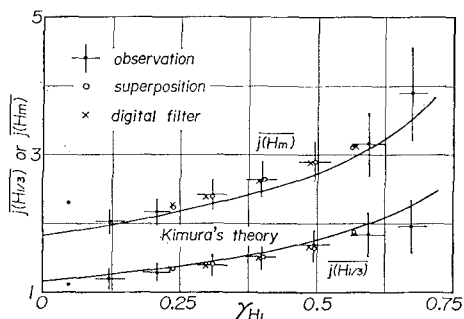
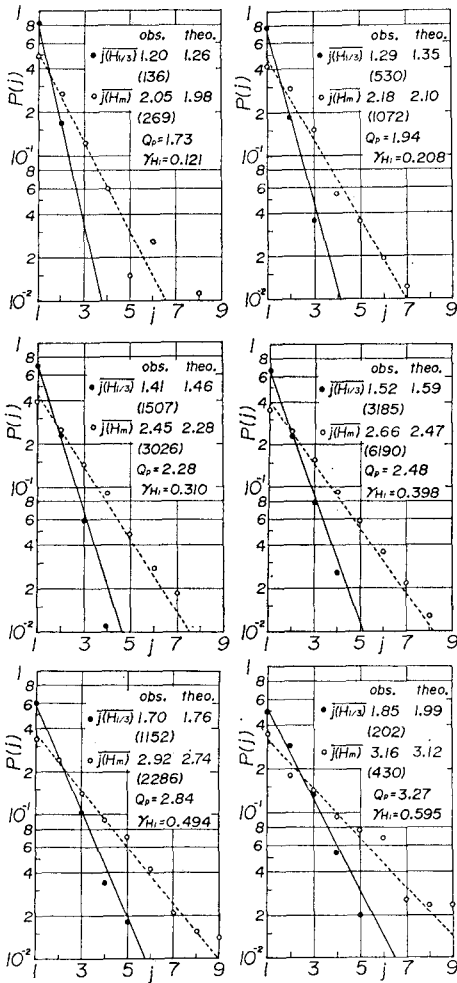
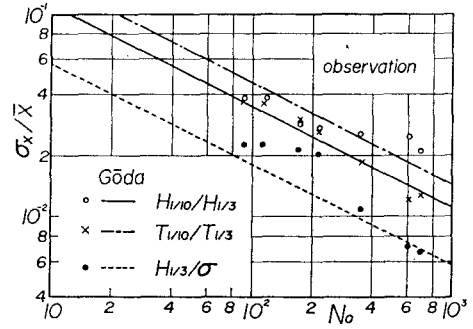
図-7 $\bar{j}(H_{1/3})$ と Q_p との関係

図-8 平均連長に対する木村の理論の適合性



図—9 連長分布に対する木村の理論の適合性



図—10 波浪統計量の統計的変動性

た波浪統計量であることを示している。また $H_{1/10}/H_{1/3}$ および $H_{1/3}/\sigma$ の変異係数は当然合田のシミュレーション結果に比べて大きく、現地波浪がより大きな統計的変動をもつが、 $T_{1/10}/T_m$ はシミュレーション結果より小さいのは興味深い。

5. 結 語

本研究の結果、各種平均波高比は $\Delta t/T_p$ により、一方各種平均周期比は $\Delta t/T_p$ および Q_p により変化するものが多く、波高分布や周期分布もこれらのパラメータによって決まる形状母数をもつ Weibull 分布で近似されるが、周期分布や $\Delta t/T_p$ が小さい場合の波高分布は Weibull 分布によって必ずしも適切に表現されないことなどが明らかになった。また、波高の平均連長や連長分布は木村の理論によりよく記述されることや観測結果における平均波高比および平均周期比の変異係数は波数とともに減少することが実証された。

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., 1977.
- 2) Kimura, A.: Statistical properties of random wave group, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., pp. 2955-2973, 1980.
- 3) 山口正隆：有限風域場における風波の統計的性質について (2)，愛媛大学紀要第III部工学，第9巻第4号，pp. 349-366, 1981.
- 4) Borgman, L. E.: Ocean wave simulation for engineering design, Jour. WH Div., Proc. ASCE, Vol. 95, pp. 557-583, 1969.
- 5) 合田良実：波浪の統計的性質に関する二、三の数値的検討，港湾技術研究所報告，第24巻第4号，pp. 65-102, 1985.

割し、各区間に属する資料の平均値と標準偏差から求めた変異係数と波数の関係を $H_{1/10}/H_{1/3}$ 、 $H_{1/3}/\sigma$ および $T_{1/10}/T_{1/3}$ について示したものであり、図中には合田⁵⁾により得られた $\xi=5$ に対するシミュレーション結果の平均的傾向が与えられている。ただし、 $H_{1/3}/\sigma$ は前述のように Q_p に依存するけれども、その依存性が弱いことおよび実用上重要な波浪統計量であることを考慮して考察の対象に選んだ。これらの図によると、いずれの変異係数も波数とともに減少し、波浪統計量が波数の増大とともに安定することや $H_{1/3}/\sigma$ が最も統計的に安定し