

波群の統計と波浪統計量による波群性の推定

中村 聡志*・加藤 一正**・望月 徳雄***

1. はじめに

越波および浮体の動揺、海洋構造物の安定、港内静穏度等の問題に波群が関係していることが明らかになってきた。これらの問題に対処するために模型実験および数値シミュレーションに波群性を考慮することが行われている。しかしながら、実験や数値計算であたえるべき波群についての現地での知見は少ない。これまでの波浪統計は、おもに平均波および有義波等の波高とその周期等の波の代表値についての統計であり、波群についての統計は行われていない。そこで現地での波群の状況を表すために、これまでの波浪統計量に加えて、高波の継続波数または継続時間などの波群性を表す統計量を導入し観測する必要がある。また、波群の統計が十分に蓄積されるまで、波群によって起きる工学的問題について検討を行うために、顕著な波群がどのような海象条件の時に現れるかを調べ、波浪統計量のみから波群性の推定を行う必要がある。

本研究では、運輸省所管の波浪観測局において波群観測を目的とした波浪データ収集を行い、波群性を表すパラメータの統計的変動性を検討する。ついで、波群が波浪統計量におよぼす影響を調べ、波群性を波浪統計量から推定する方法を検討する。

2. 現地観測と期間中の波浪状況

現地観測は、伏木富山港沖（水深 17 m）で 93/11～94/4 および、鹿島港沖（水深 25 m）で 94/2～5、潮岬沖（水深 50 m）で 94/6～12、鳥取港沖（水深 30 m）で 94/12～95/1 にわたって実施した。データ収集は、2 時間ごとに、サンプリング周波数 2 Hz、収録時間 1 時間 59 分で行った。波の連なりを統計処理するには通常の波浪統計処理に用いるより長時間のデータが必要になること、また、ほぼ連続したデータ収集を行うため、A/D 変換ボードと光磁気記録器を備えたパーソナルコンピュータを各波浪観測局（波高計センサーの基地局）のアナログ出力

端子に接続し収録を行った。

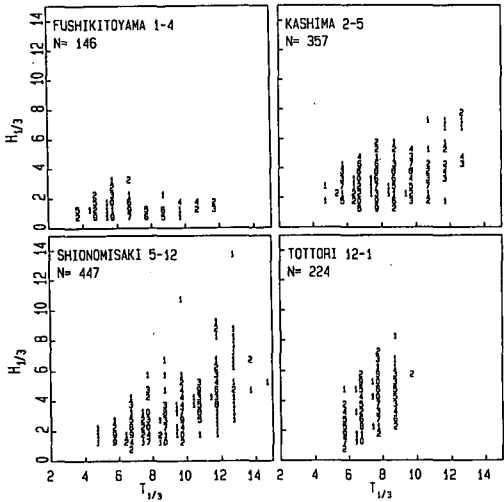
各観測地点での水位変動の歪度および尖鋭度の平均値および標準偏差値を表一に示す。いずれの観測地点の歪度および尖鋭度の値も正規分布の値に近く、碎波等による波の特性の変化を考慮する必要はない。図一に各地点の観測期間中の有義波高とその周期の結合度数分布を示す。

3. 波群性を表すパラメータとその出現頻度

波群性の有無についての判断は人間の感覚によるもので、概念および定義がはっきりとしていない。波群性について、「波高がビートを打っている。高い波がまとまってくる。周期が一定の波がまとまっている。または水位

表一 水位変動の歪度および尖鋭度

	歪 度	尖 鋭 度
伏木富山港	0.068 ± 0.054	3.0 ± 0.079
鹿島港	0.086 ± 0.041	3.0 ± 0.069
潮岬	0.059 ± 0.036	3.0 ± 0.086
鳥取	0.086 ± 0.036	3.0 ± 0.081



図一 有義波高とその周期の度数分布

* 正会員 工修 港湾技術研究所 海洋環境部 主任研究官
** 正会員 工博 港湾技術研究所 海洋環境部 灘砂研究室長
*** 港湾技術研究所 海洋環境部 灘砂研究室

変動の振幅が変調を受けている」等の記述があるように、研究者がどんな現象に注目しているかによって波群性のとらえ方は異なり、その注目している現象を表すために様々なパラメータが提案され現地の波に対しても用いられている。代表的な波群性を表すパラメータとして、波のうなりの高さを表す Funke and Mansard (1979) のグループネスファクター GF (波のエネルギーの変動係数) および波群のうなり幅 ρ 、波の連なりの継続時間または波数を表す合田 (1976) の高波の連長 $\overline{J_1}$ および繰返し連長 $\overline{J_2}$ 、平均連なり周期 $\overline{T_r}$ 、波高がそろっている様子を表す隣合う波の相関係数 γ_{HH} および波形の包絡線相関係数 κ (Battjes, 1984)、スペクトルによる表現としては分布型の幅を表す ν 、 Q_p (合田, 1974) 等がある。これらは同じ現象を違った見方で表現しているにすぎず、パラメータ相互の間の相関は高い。表-2 に鹿島沖および潮岬沖のデータを解析して得られたパラメータ間の相関係数を示す。どのパラメータを使っても水位変動記録にみられる感覚的な波群性の強さとパラメータの示す値とは対応するので、計算の簡便さと、これまで行われてきている波浪統計のゼロクロス法による波別解析の処理方法を考慮して、以後の解析では波群性を表すパラメータとして隣合う波の相関係数 γ_{HH} を用いる。

次に、隣合う波の相関係数 γ_{HH} の変動性に対するデータ長の影響を調べる。合田 (1985) は波浪統計量の変動性について疑似不規則波数値シミュレーションによって、波高等の変動係数がデータ数が少ないうちは波の数の $-1/2$ 乗に比例し、波の数が 100 を越えるあたりから変動係数が一定値を示すことを明らかにした。この結果を利用してこれまで波群についても 100 波群以上 (119 分間) という同様の基準で収録し、解析を行ってきた。しかし、統計処理を今後行っていくためには波群についても統計的変動性が少なくなるデータ長を明らかにしておく必要がある。ここでは、119 分間の記録の中では波群の状況があまり変わらないと仮定して、データ長による γ_{HH} の変動性を示す (図-2)。縦軸は 119 分間の γ_{HH} で基準化した t 分間の γ_{HH} の変動係数 C.V. である。C.V. は本来、正の変量のばらつきの程度を示す指標であるが、現地の γ_{HH} の値はほとんどの場合正であるので、これを

用いた、C.V. 値は 60 分以上のデータ長で安定化する傾向を示している。100 分以上で再び C.V. 値が小さくなるのはデータ長が最大で 119 分しかない影響である。

次に、 γ_{HH} の定常性について調べる。現地の海において、波浪状況が長時間にわたって定常状態にあることは稀である。波群性についても同様であろうか。図-3 は 119 分間の記録の中で開始時間をずらして解析した 10 個の 60 分間の γ_{HH} の C.V. 値と γ_{HH} とをプロットしてある。 γ_{HH} が小さいときすなわち波群性が弱いとき γ_{HH} の C.V. 値は大きく、 γ_{HH} の値が 0.2 以上で小さく安定している。波群性の統計処理においては 60 分以上のデータ長が必要であり、 γ_{HH} の値が 0.2 以上で有意となる。

本論文では、特に断りがない場合 119 分間のデータを用いて γ_{HH} の計算をすることとする。図-4 に観測地点の γ_{HH} の出現相対度数分布を示す。各図とも年間を通した観測ではなく、また、サンプル数も異なるので、分布型に差異がみられる。しかし、図-1 に示した有義波高及びその周期の度数分布の違いと比べてその差は小さい。

4. 波群性が波高分布および周期分布におよぼす影響

顕著な波群がどのような海象条件の時に現れ、波浪統計量にどのような影響を及ぼすかを知っておくことは、

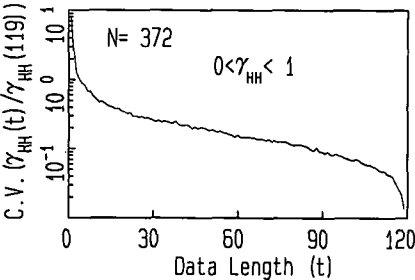


図-2 データ長による γ_{HH} の安定性

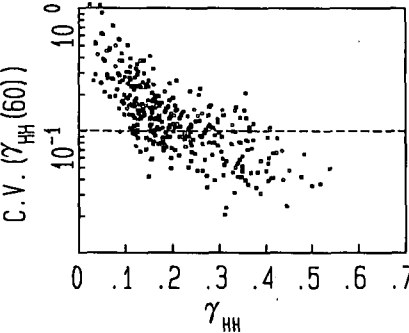
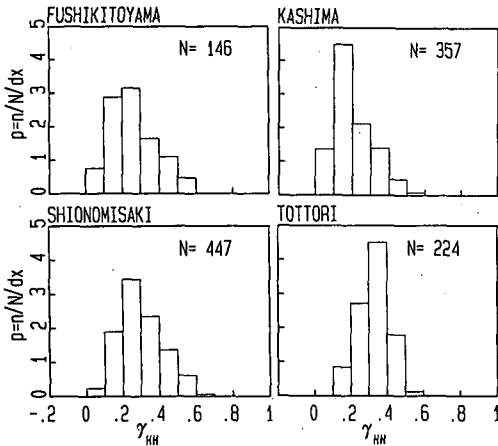
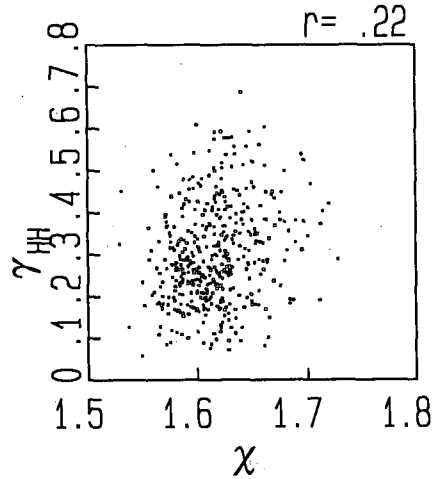


図-3 γ_{HH} の時間変動性

表-2 波群性パラメータ間の相関

潮 鹿	γ_{HH}	$\overline{J_2}$	GF	Qp	κ
γ_{HH}		0.94	0.82	0.88	0.68
$\overline{J_2}$	0.94		0.76	0.84	0.71
GF	0.79	0.76		0.58	0.47
Qp	0.90	0.84	0.64		0.71
κ	0.82	0.58	0.80	0.64	

図-4 観測地点毎の γ_{HH} の出現相対度数分布図-5 γ_{HH} と χ との関係

波群の引き起こす様々な問題を考える上で必要である。波群性は代表波の波高または周期の大きさのみとは関係しない。一つの例として時化の来襲（波高の増大）とともに γ_{HH} の値は大きくなり、波高が小さくなくてもしばらくの間そのままである。なぜ波群性が波高・周期の大きさと比例しないのか。それは、波群性が波の集まりとしての性質を表すからである。集合としての性格はその分布型に現れるという観点で波高分布・周期分布を波群性と関連づけながら多数見ていると、波群性のある時、現地観測で得られる波高分布型は、レーリー分布と比べて波高の高い波の割合が多いように思われる。そこで、現地波高の分布型とレーリー分布型との隔たりの度合いを調べた。簡単な隔たりの指標としては、有義波高と平均波高の比 $\chi = H_{1/3}/H_{mean}$ に現れる。現地での χ は 1.5 から 1.75 の値になる。現地の波高分布をレーリー分布と仮定すると $\chi = 1.60$ である。図-5 に示すように γ_{HH} とレーリー分布からの隔たりの指標として用いた波高比 χ と間にはわずかな相関がある。一方、現地観測で得られる周期分布型は様々な形をしている（図-6）。周期の分布型については簡便で理論的な分布型はないため、分布の形状の違いを表す指標として四分位統計値（Quartile Value）（図-7）とそれを用いた四分位歪度 QS (Quartile Skewness),

$$QS = \frac{(Q_{75} - Q_{50}) - (Q_{50} - Q_{25})}{Q_{75} - Q_{25}} \dots\dots\dots (1)$$

を用いた。四分位統計値とはデータを小さい順に並べ、0%, 25%, 50%, 75%, 100% の位置にあるデータの値である。各値は、それぞれ最小値 Q_0 、第1四分位数 Q_{25} 、中央値 Q_{50} 、第3四分位数 Q_{75} 、最大値 Q_{100} で表される。また、四分位歪度 QS は、分布が非対称形を示す場合でもデータをより適切に要約する簡単な方法である。QS の特徴として峰が一つの分布型で値が負の時、平均値 < 中

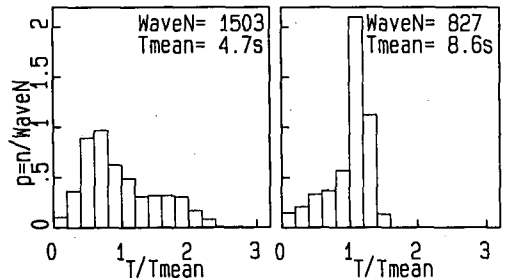


図-6 現地観測で得られる周期分布型の例

央値 < 最頻値となる関係がある。図-8 に γ_{HH} と周期分布の四分位歪度 QS との関係を示す。周期分布の歪度と波群性の間には強い相関がある。波高分布型および周期分布型におよぼす波群性の影響は、周期分布型に強く現れるといえる。また、波群による工学的な問題では平均周期よりも周期の最頻値が重要になる。

5. 波浪統計量による波群性の推定

波群性を考慮した波浪統計が行われるまでの間に波群性を検討する場合、また、過去に起こった事例が波群によるものかどうかを判断する場合に波浪統計量から波群性を推定する必要がある。前章で示したように、周期分布型がわかればその歪度によって波群性を推定することはたやすい。しかしながら、これまでの波浪統計処理では QS や四分位値の計算はされていない。また、周期の統計を使うとしても、波浪統計における周期の統計は波高に依存した周期の統計であり、周期のみの統計ではないので周期比 $\tau = T_{1/3}/T_{mean}$ を分布型の歪を表す指標として直接用いることはできない。事実、 τ と γ_{HH} との相関は図-9 に示すように低い。そこで、波群性 γ_{HH} とわずかな

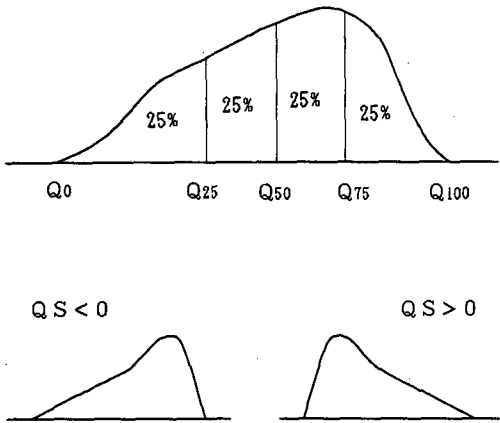


図-7 四分位統計値と四分位歪度 QS

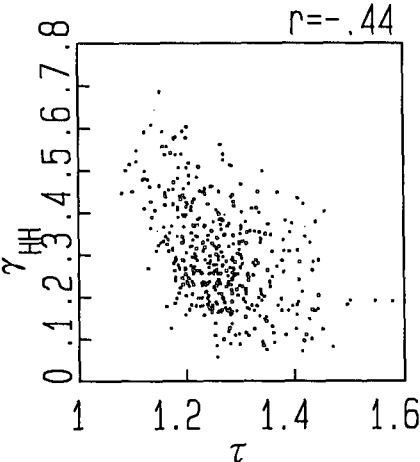


図-9 γ_{HH} と τ との関係

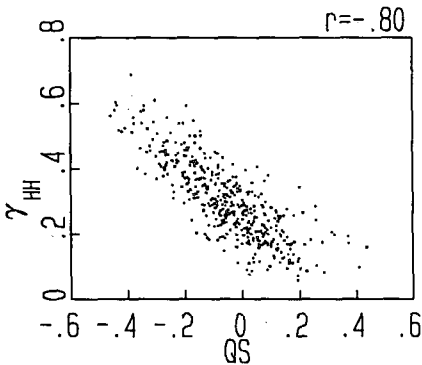


図-8 γ_{HH} と QS との関係

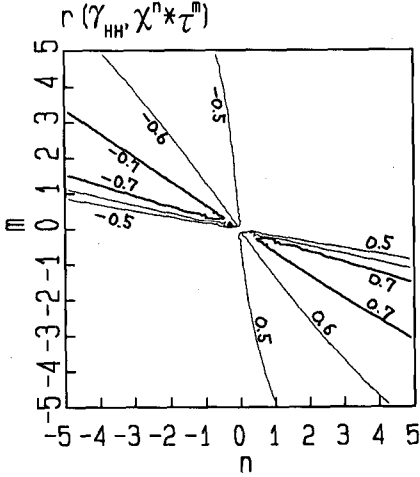


図-10 γ_{HH} と $\chi^n \tau^m$ との相関係数のコンター

相関を持っている波高比 χ と周期比 τ からなるパラメータ $\chi^n \tau^m$ を作り、 n, m の値は現地データによって γ_{HH} と相関が高くなる組み合わせを求めた。図-10 に γ_{HH} と $\chi^n \tau^m$ との相関係数のコンターを示す。 $n:m$ が約 5:-2 のとき相関が高い。他の観測地点でも同様の関係がある。この比でできたパラメータうちの $\chi^{5/2} \tau^{-1}$ は、

$$\frac{\chi^{5/2}}{\tau} = \left(\frac{H_{1/3}}{H_{mean}} \right)^2 \sqrt{\frac{H_{1/3}/L_{1/3}}{H_{mean}/L_{mean}}} \dots\dots\dots (2)$$

と書き換えることができ、波長で平均した単位面積当たりの有義波のエネルギーと平均波のエネルギーの比と波形勾配比の平方根との積で表される。このパラメータを用いて、 γ_{HH} を、

$$\gamma_{HH} = a \frac{\chi^{5/2}}{\tau} + b \dots\dots\dots (3)$$

で推定した。ただし、係数 a, b は観測地毎に最小自乗法で決めた。係数 a, b の値を表-3 に示す。図-11 は式(2, 3)で推定した γ_{HH} と実測値との比較である。観測地点によって係数 a, b の違いはあまりなく、波高比 χ と周期比 τ によって波群性の推定ができる。

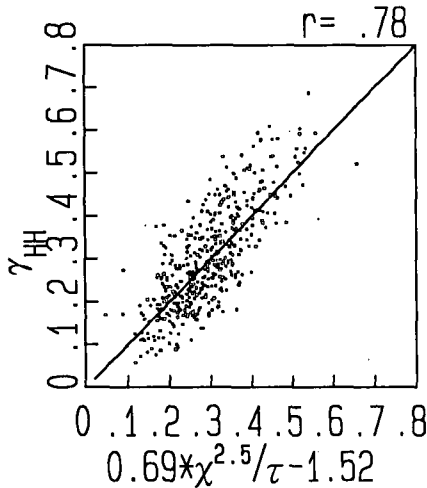
表-3 最小自乗法で求めた係数値

	a	b
伏木富山港	0.74	-1.69
鹿島港	0.69	-1.50
潮岬	0.69	-1.52
鳥取	0.72	-1.57

6. おわりに

得られた結論は以下の通りである。

- 1) 隣合う波の相関係数 γ_{HH} の統計的安定には、変動係数 C.V. 値が 0.1 以下になる 60 分以上のデータ長が必要である。

図-11 γ_{HH} の推定値と実測値との比較

- 2) γ_{HH} の値が 0.2 以下の時, γ_{HH} の統計的変動性によって, 収録開始時間による値のばらつきが大きい。
- 3) 波群の影響は周期分布型に強く現れ, 周期分布型の分布の最頻値が平均値より大きい (四分位歪度 $QS < 0$) 時に波群性が強い。
- 4) γ_{HH} は有義波と平均波の波のエネルギー比 (波長平均した単位面積当たりのエネルギー比) と有義波と平均波の波形勾配比の平方根の積で推定することができる

(式 (2, 3)).

なお, 波浪データの収集・使用にあたって第一港湾建設局新湊事務所, 第二港湾建設局鹿島港工事事務所, 第三港湾建設局機械整備事務所ならびに高知港工事事務所, 鳥取港事務所, と和歌山県土木本事務所のご協力を頂いた。ここに記し謝意を表したい。

参 考 文 献

- 加藤一正・中村聡志・池田直太 (1991): 波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定—波崎海洋研究施設における現地観測にもとづく検討—, 港湾技術研究所報告, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 137-163.
- 合田良実・永井康平 (1974): 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技術研究所報告, 第 13 巻, 第 1 号, pp. 3-37.
- 合田良実 (1976): 波の連な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.
- 合田良実 (1985): 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.
- 鈴木康正・河合弘泰・望月徳雄・松森孝弘 (1994): スペクトル形状による波群特性の変化, 港湾技術研究所報告第 33 巻, 第 2 号, pp. 3-57.
- Battjes, J. A. and G. Ph. van Vledder (1984): Verifikation of Kimura's Theory for Wave Group Statistics, Proc. 19th Intl Conf. Coastal Engg., pp. 642-648.
- Funke, E. R. and Mansard, E. P. D. (1979): On the Synthesis of Realistic Sea State in a Laboratory Flume, National Research Council Technical Report LTR-HY-66.