

現地波浪の Wave Group 特性に関する研究

間 瀬 肇*・岩 垣 雄 一**

1. ま え が き

不規則波の wave group (波群, 波の連なり) の研究は比較的最近始められたものであり, 合田¹⁾によって海岸工学上のいくつかの問題に大きな影響を与えるであろうことが指摘されている。

波高の連の長さの確率特性についての理論的研究には, 隣り合う波は互いに独立であると仮定したランダム統計理論によるものと, 狭帯域スペクトルを仮定した包絡波形理論によるものがある²⁾が, ごく最近, 木村²⁾は波高の時系列がマルコフ過程的な特性を有していることを考慮した連の理論を提案している。

一方, 現地波浪の波高の連の長さを調べたものとしては, Wilson et al.³⁾, Rye⁴⁾, 合田¹⁾, Chakrabarti et al.⁵⁾, Burcharth⁶⁾ の研究が挙げられる。そのうち, 合田は現地波浪の波高の平均連長と, 数種のスペクトル形を数値的にシミュレートした不規則波の波高の平均連長とを, スペクトルの尖鋭度パラメーターを横軸にとって比較した結果, 前者の方が後者よりも大きいことを報告し, また, Burcharth も現地波浪とそのスペクトル形を実験水槽内でシミュレートした不規則波を用いて波高の連長を比較し, やはり合田と同様, 前者の方が大きいことを報告している。木村²⁾は彼の理論を数値シミュレーション波を用いて検証しているが, 合田や Burcharth の解析結果のように, 現地波浪の波高の連長はシミュレーションによる不規則波のそれとは異なっている可能性がある。

本研究は, 現地波浪の wave group 特性, とくに, 波の発達・減衰に伴う変化を調べるとともに, 観測値と木村の連の理論値との比較検討を行うものである。

2. 解析に用いた波浪観測記録

今回の解析にあたっては, 和歌山県御坊海域で得られた台風 8013 号の波浪記録と, 琵琶湖彦根愛西湖岸における波の発達期から減衰期を含む一連の波浪記録を用いた。

御坊海域における波浪観測記録は次のようである。波

高計設置点は和歌山県御坊市の鰹島西方約 1 km 沖の水深 28 m の地点であり, そこには超音波式波高計 (関西電力(株)所有) が設置されている。波浪は, 通常毎偶数時 0 分から 20 分間, 台風時などの異常時の波高のピーク付近では毎時 20 分間観測されている。出力結果は, 記録紙と有義波演算装置によって得られる各 20 分間の波の数, H_{max} , $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ および $\bar{H}$ とそれぞれの周期である。個々の波の波高は得られていないので, 各 20 分間の観測記録の平均水位を目視で決め, 波をゼロアップクロス法で定義して求めた。ただし, 記録紙上で 1 mm (現地スケールで 10 cm) 以下の波は無視した。このようにして読み取って得られた H_{max} , $H_{1/3}$ および $\bar{H}$ を有義波演算装置による値と比較し, 読み取りが正しいことを確かめた。台風 8013 号は 1980 年 9 月 7 日 9 時にマリアナ群島付近で発生してから 4 日ほどで日本に上陸し, 九州から山口県を通過し, 日本海へ抜けている。

琵琶湖における波浪観測は, 岩垣・土屋らによって 1975 年 3 月より 1 年間にわたり, 彦根市と長浜市において実施された⁷⁾。解析に用いた観測記録は, 1975 年 10 月 5 日 11 時 27 分から 23 時までの彦根愛西湖畔における波高計 N-9 (設置水深 4 m), N-1 (同 1 m) の波浪記録である。これらの記録はサンプリング間隔 0.04 sec で A-D 変換され, 磁気テープにファイルされている。解析にあたっては, 連続記録を 20 分間ごとに分割し, その間の波は定常であるとして取り扱う。

3. 解析結果および考察

Wave group を表わすものとしては, 波高の連の長さや高波の繰り返し長がある¹⁾。

図-1 は波の連なり方の模式図をいろいろな場合について示したものである。例えば, 波高の連の長さが長くても (c) のように波高が揃っていて grouping が顕著でない場合もあり, (d) のように grouping が顕著な場合も考えられる。また, 逆に波高の連の長さが短かくても (a) と (b) のように grouping に顕著な差がある場合がある。このような grouping の差を表わすには, 基準値 H_0 の取り方を変えればある程度わかるが, それよりも図-1 の点線に示すような波の包絡線の変動の大

* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

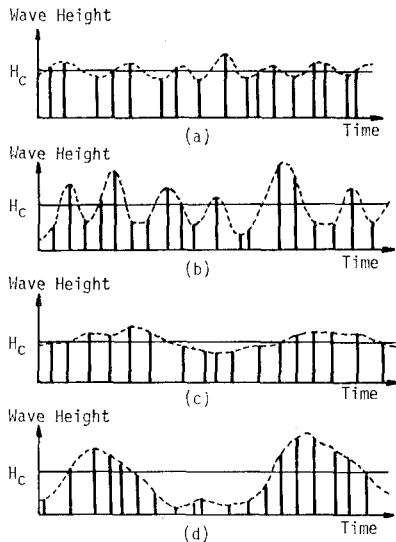


図-1 Wave Group の模式図

きさを表す Groupiness Factor⁸⁾ (略して GF) を用いればよい。波高の連の長さおよび GF がともに大きければ、図-1 (d) のように grouping が顕著であることがわかる。

台風 8013 号の波浪観測記録については、デジタル化されていないので、GF のかわりに次式の波高の変動係数 δ を用いることにする。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} / \bar{H} \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 N は波の数、 $\bar{H}$ は平均波高である。

(1) 台風 8013 号の波浪観測記録の解析結果および考察

図-2 は最大波高 $H_{\max}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ の時間変化を示したものである。図中の G と D はそれぞれ波の発達期と減衰期を表わしている。

図-3 は次式に示す引き続く波高の相関係数の時間変化を示したものである。

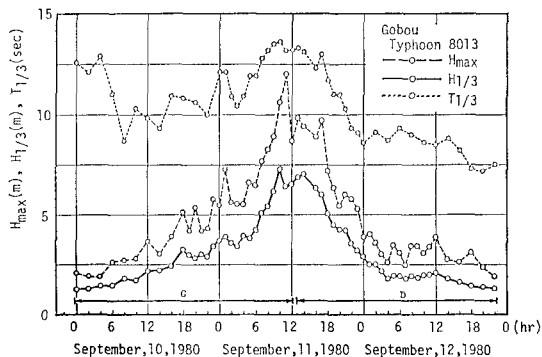


図-2 最大波高、有義波高および有義波周期の時間変化 (御坊)

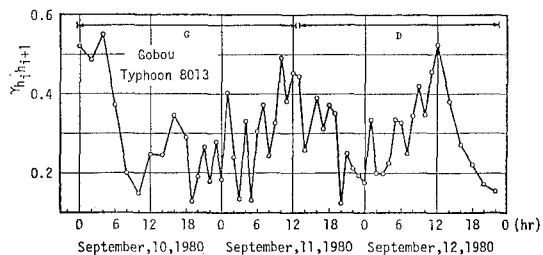


図-3 前後の波高の相関係数の時間変化 (御坊)

$$r_{H_i, H_{i+1}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (H_i - \bar{H})(H_{i+1} - \bar{H}) / \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2 \right\} \quad \text{..... (2)}$$

9月10日4時ごろの発達期の初期や12日12時ごろの減衰期の終わりの方で、相関係数が大きくなるのは、うねり性の波の影響であると考えられる。また、11日10時ごろの波高のピーク付近でも大きくなっていること、波高が大きくなるにつれて相関係数が大きくなり、波高が小さくなると小さくなることから、引き続き波高の相関係数が大きいときは、1波あるいは2波おいた次の波の波高との相関も無視できなくなる。

図-4 は平均波高 $\bar{H}$ を基準値としたときの波高の平均連長と高波の平均繰り返し長さの時間変化を示したものである。20 分間の波浪観測記録の波の数は 100~200 波程度なので、例えば基準波高を $H_{1/3}$ とすると、 $H_{1/3}$ を越える波は 15~30 波程度となり、連の個数は少なくなって統計的変動が大きくなる。したがって、ここでは基準波高としては平均波高を用いて、波高の連の長さや高波の繰り返し長さの平均長を求めた。図-4 と図-3 の時間変化を比べてわかるように、両者は非常に良く対応しており、前後の波高の相関係数が大きいほど、波高の平均連長や高波の平均繰り返し長さが大きいことがわかる。

ここで、前後の波高の相関を考慮した木村の連の理論²⁾と比較することにする。この理論によると、平均波高 $\bar{H}$ を基準波高としたときの波高の平均連長 $j(\bar{H})$ と高波の平均繰り返し長さ $k(\bar{H})$ はそれぞれ次のように表わされる。

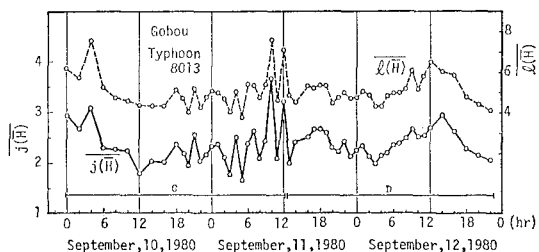


図-4 波高の平均連長および高波の平均繰り返し長さの時間変化 (御坊)

$$\overline{j(\bar{H})} = \frac{1}{1-p_{22}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\overline{l(\bar{H})} = \frac{1}{1-p_{11}} + \frac{1}{1-p_{22}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし, p_{11} , p_{22} は次式で定義される.

$$p_{11} = \int_0^1 \int_0^1 p(h_1, h_2) dh_1 dh_2 \int_0^1 Q(h_1) dh_1 \dots (5)$$

$$p_{22} = \int_1^\infty \int_1^\infty p(h_1, h_2) dh_1 dh_2 \int_1^\infty Q(h_1) dh_1 \dots (6)$$

ここで, $p(h_1, h_2)$ と $Q(h_1)$ は, それぞれ次式に示す平均波高で無次元化した 2 次元および 1 次元 Rayleigh 分布である.

$$p(h_1, h_2) = \frac{\pi^2}{4} \frac{h_1 h_2}{1 - \left(\frac{\rho\pi}{2}\right)^2} \times I_0 \left\{ \frac{\pi}{2} \frac{1 - \frac{\rho\pi}{2}}{1 - \left(\frac{\rho\pi}{2}\right)^2} h_1 h_2 \right\} \times \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \frac{h_1^2 + h_2^2}{1 - \left(\frac{\rho\pi}{2}\right)^2} \right\} \dots (7)$$

$$Q(h_1) = \frac{\pi}{2} h_1 \exp \left(-\frac{\pi}{4} h_1^2 \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで, $I_0(\)$ は変形ベッセル関数である. 式 (7) に含まれる相関パラメーター ρ と波高の相関係数には次の関係がある²⁾.

$$\gamma_{h_i h_{i+1}} = \frac{E \left(\frac{\rho\pi}{2} \right) - \left\{ 1 - \left(\frac{\rho\pi}{2} \right)^2 \right\} K \left(\frac{\rho\pi}{2} \right)}{1 - \frac{\pi}{4}} \dots\dots\dots (9)$$

ただし, $K(\)$ および $E(\)$ は第 1 種および第 2 種完全楕円積分である.

式 (9) を用いて波高の相関係数から ρ を求め, 式 (5) と (6) から p_{11} , p_{22} を求めた後, 式 (3) と (4) から $\overline{j(\bar{H})}$ と $\overline{l(\bar{H})}$ を求める.

図-5 はこのようにして求めた $\overline{j(\bar{H})}$ と $\overline{l(\bar{H})}$ の理論値と観測値を比較したものである. この図から, 理論値と観測値には若干の相違は見られるものの, 両者はおおむね一致していると言える. したがって, 相関係数がわかれば, 波高の連の長さや高波の繰り返し長さを推定することができる.

図-6 は波高の変動係数の時間変化を示したものである. これは波高のピーク付近を含む 9 月 11 日の 0 時から 14 時で大きく変わっているようであり, 図-3, 4 に見られたような傾向とは異なって, 発達期の初期では大きく変わっていない. したがって, 波高のピーク付近では, grouping が顕著である 図-1 (d), 発達期の初期は図-1 (c) のような波の連なり方であると言えよう.

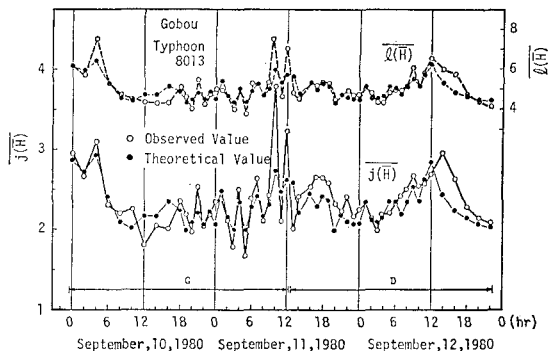


図-5 波高の平均連長および高波の平均繰り返し長さについての実測値と理論値との比較 (御坊)

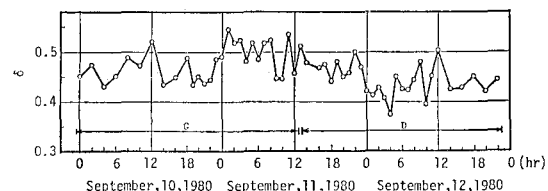


図-6 波高の変動係数の時間変化 (御坊)

(2) 琵琶湖における波浪観測記録の解析結果および考察

図-7 は, 波高計 N-9 と N-1 の有義波高および有義波周期の時間変化を示したものである. 波は 11 時 27 分から 14 時にかけて急速に発達し, その後定常状態となり, 18 時から徐々に減衰している. 各 20 分間の波浪記録に含まれる波の数は 300~600 波である.

図-8 は, 波高の平均連長 $\overline{j(\bar{H})}$, 高波の平均繰り返し長さ $\overline{l(\bar{H})}$ および Groupiness Factor の時間変化を示したものである. この図より台風 8013 号の波浪記録の解析結果では, 波高のピーク付近で, $\overline{j(\bar{H})}$, $\overline{l(\bar{H})}$ および波高の変動係数 δ のいずれも大きくなっていったが, 琵琶

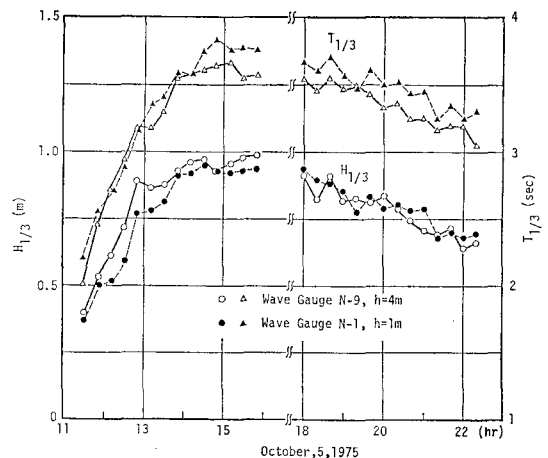


図-7 有義波高および有義波周期の時間変化 (琵琶湖)

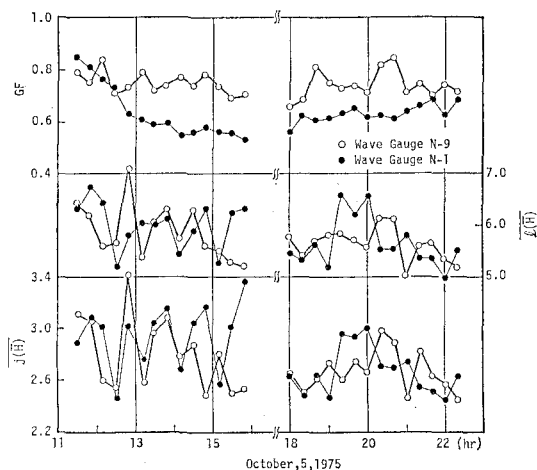
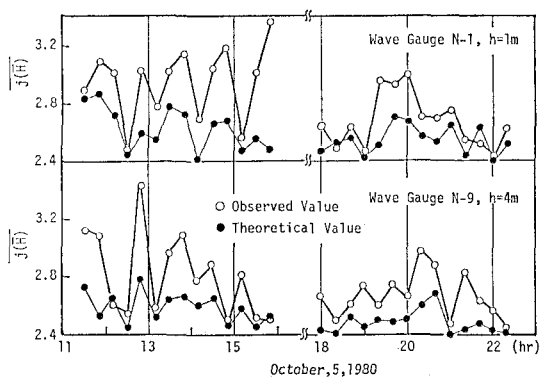
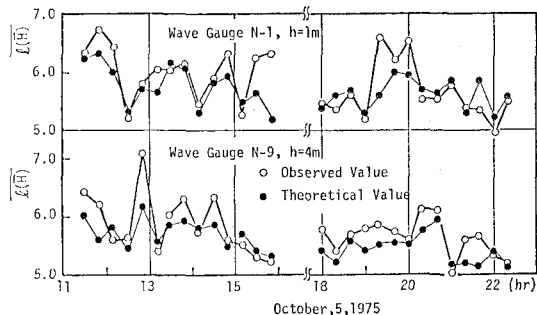


図-8 波高の平均連長, 高波の平均繰り返し長さおよび Groupiness Factor の時間変化(琵琶湖)



(a)



(b)

図-9 波高の平均連長および高波の平均繰り返し長さについての実測値と理論値との比較(琵琶湖)

湖では、水深が1mmのGFは波の発達とともに小さくなり、減衰とともに大きくなるという傾向が見られること、 $\bar{j}(\bar{H})$ や $\bar{l}(\bar{H})$ には何れ特定の傾向が見られないことがわかる。

図-9は、ここには図示していないが前後の波高の相関係数を用いて、木村による理論値を計算し、実測値と

比較したものであり、(a)は波高の平均連長について、(b)は高波の平均繰り返し長さについての結果である。これらの図で特徴的なことは、(b)の高波の平均繰り返し長さについては、理論値と実測値は良く一致しているのに対して、(a)の波高の平均連長については、実測値の方が理論値より平均的に約15%大きいことである。

前後の波高の相関係数は、最も小さいものでも0.35であって、台風8013号の波浪の場合に比べて大きくなっている。この値が大きいと、1波あるいは2波おいた波高の相関係数は無視できなくなるのに対し、木村の理論では引き続き波高の相関のみを考慮した単純マルコフ過程を仮定しているために、理論値の方が実測値よりも小さくなるものと考えられる。とくに、その影響は、高波の繰り返し長さよりは波高の連の長さに表われるようであって、図-5においても、波高の相関係数がい大きいときには、実測値の方が理論値より若干大きいようである。

4. あとがき

本研究は、現地波浪の波の発達・減衰に伴う wave group の変化を和歌山県御坊での台風8013号と琵琶湖における波浪記録を用いて調べるとともに、波高の平均連長と高波の平均繰り返し長さについては、木村の連の理論による値との比較を行った。主な結論は次のようである。

- (1) 台風8013号の波浪については、波の発達期の初め、減衰期の終わりで、うねり性の波の影響のためか波高の平均連長や高波の平均繰り返し長さが大きく、波高のピーク付近では、これらの値とともに波高の変動係数も大きく、grouping現象が著しいことがわかった。
- (2) 琵琶湖における波浪については、波が発達しても波高の平均連長や高波の平均繰り返し長さはあまり変化しないし、Groupiness Factor はかえって減少するという台風8013号の波浪とは逆の傾向があることがわかった。
- (3) 木村の連の理論は、ほぼ実測値を説明できるが、琵琶湖の波のように前後の波高の相関係数がい大きいときには、波高の平均連長は実測値の方が理論値よりも15%程度大きくなる。

解析に用いた波浪記録は2種類のみであり、今後多くの例を解析して一般性のある知見を得たいと考えている。

最後に、観測資料を提供して下さった関西電力(株)御坊火力建設所の関係者の方がたおよび有益な助言を頂いた鳥取大学工学部 木村 晃助教授に深く感謝の意を表

するとともに、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(1)(代表者岩垣雄一)および奨励研究(A)による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 合田良実: 波の連なりの統計的特性, 港湾技術研究所報告, 第15巻, 第3号, pp. 3~19, 1976.
- 2) Kimura, A.: Statistical properties of random wave group, Proc. 17th Coastal Eng. Conf., pp. 2955~2973, 1980.
- 3) Wilson, J. R. and W. F. Baird: A discussion of some measured wave data, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., pp. 113~130, 1972.
- 4) Rye, H.: Wave group formation among storm waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 164~183, 1974.
- 5) Chakrabarti, S. H. and Snider, R. H.: Mean length of ocean waves, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, No. 36, pp. 5665~5667, 1974.
- 6) Burcharth, H. F.: A comparison of natural waves and model waves with special reference to wave grouping, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., pp. 303~318, 1980.
- 7) 岩垣雄一・土屋義人ほか: 琵琶湖における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報, 第19号 B-2, pp. 361~379, 1976.
- 8) Funk, E. R. and E. P. D. Mansard: Synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, Hydraulics Laboratory Report LTR-HY-66, National Res. Council of Canada, 54 p., 1979.