

外洋波の波高と周期との結合確率分布について

本 多 忠 夫*・ 光 易 恒**

1. 緒 言

1971年から1976年にかけて9回の航海を行い、クローバー型波浪計を用いて日本周辺の海域における外洋波の計測を行なった。その代表的データを解析してこれまでに海洋波の方向スペクトルの特性を明らかにした^{1)~3)}。今回は、約10分間の波浪データを187個含む67例の全データを解析して外洋波の統計的性質を調べた。解析はまだ進行中であるがその一部の結果を報告する。

風波の波面の統計的性質に関しては、この約20年の間に多くの理論的研究が行われ、線型近似が許されかつスペクトル幅が狭い波の場合には多くの有用な結果が導かれている。これらの理論的結果は、比較的良好に風波の統計的性質を説明しているが、実際の風波は非線型性を含みそのスペクトル幅も必ずしも狭くないためいくつかの問題点が残されている。筆者等は、前回¹⁾、風洞水槽において精密に測定された風波のデータを用いて、データの解析法が風波の統計的性質に及ぼす影響を明らかにするとともに、風波の統計的性質を波高と周期との結合確率分布を中心にして調べた。

今回の研究は、前述の外洋波のデータを用いて前回と同様な解析を行ったものである。すなわち、データの解析法が海洋波の各種の統計量に及ぼす効果、海洋波のパワースペクトルの形、パワースペクトルより導かれる波

面に関する各種の統計量と実際に波面のデータを解析して求めた同種の統計量との対応関係、波高と周期との結合確率分布等を調べた。

2. 波浪データおよび解析法

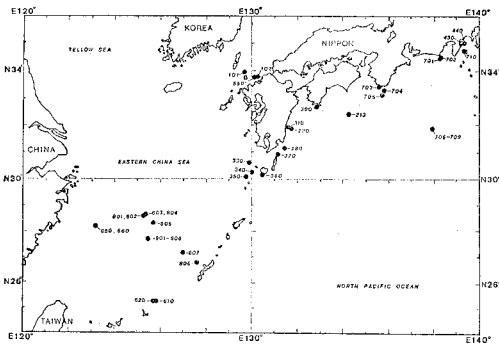
外洋波の方向スペクトルを計測する目的で開発したクローバー型波浪計を用いて計測した波面の上下加速度 $\ddot{\eta}(t)$ のデータをもとにして波の周波数スペクトルおよび波面 $\eta(t)$ を求めた。波に対するこの波浪計の応答は周期約3秒以上の波に対してはほぼ平坦であるが、それ以下の短かい波に対しては応答が低下する。そこで実験的に求めたブイの応答曲線を利用して応答特性の補正を行った。しかしながらこの応答特性の補正にもかかわらずブイの形状からの制約のため約1.7秒より短かい波浪に対しては精度はあまりよくない。このクローバー型波浪計を用いて日本周辺の海域の海洋波の計測を行うため過去6年間(1971年から1977年)に9回の航海を行った。観測点、観測年月日等に関するデータはデータ No.とともに表一および図一に示されている。波浪測定中の気象条件は今回は示されていないがおよそ次の通りであった。ほとんど風のない状態、風速4~5m/s、10m/s前後および15~20m/s。このうち中間風速の10m/s前後の発生域における外洋波の測定データが数多く、うねりに関する上質のデータは数が少ない。

表一 データ No., 年月日, 測定海域および観測船

データ No.	年 月 日	海 域	観 測 船 (所属)	備 考
200	1971.12.21~72.1.2	北太平洋および玄界灘	あおたか (三井海洋開発)	応力研臨時事業 No. 1
300	1972.12.10~12.19	日向灘および南西諸島	わかしお (芙蓉海洋開発)	
400	1973.1.16~1.25	相模湾および駿河湾	淡 青 丸 (東大海洋研)	
500	1973.2.13~2.19	相模湾および玄界灘	進 徳 丸 (航海訓練所)	造船 SR-132
600	1973.5.15~6.20	東支那海	白 鳳 丸 (東大海洋研)	AMTEX 予備調査
700	1974.2.9~2.15	遠州灘、潮岬、北太平洋	望 星 丸 (東海大学)	AMTE '75
800	1975.2.8~2.26	東支那海	東海大学丸Ⅱ世 (東海大学)	
900	1975.2.18~2.28	東支那海	白 鳳 丸 (東大海洋研)	
100	1976.1.18~1.20	玄界灘	わかしお (芙蓉海洋開発)	応力研臨時事業 No. 2

* 正会員 九州大学助手 応用力学研究所

** 正会員 理博 九州大学教授 応用力学研究所



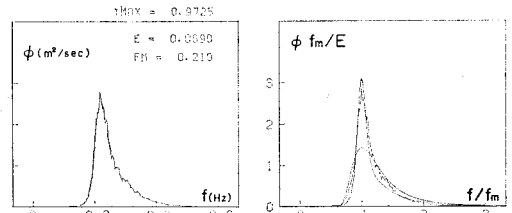
図—1 波浪測定海域

磁気テープに記録された加速度のデータ $\eta(t)$ は1ブロック2048個ずつのデジタル形式のデータに変換された。sampling time はデータ No. 213 のみ0.34秒で他は全て0.40秒である。したがって、1ブロックの測定長は約13.6分(データ No. 213 のみ11.4分)である。 $\eta(t)$ のデータは各ブロックごとにFFT法によりフーリエ変換された後項別に積分された。この積分されたフーリエ係数をもとにして波のスペクトルを求める一方、FFT法により逆フーリエ変換して表面波形 $\eta(t)$ を求めた。この場合、このまま表面波形を合成すると低周波成分に非常に大きな重みがかかるため、雑音の混入等に原因して低周側に異常が生じる。低周波側に出現する異常に大きな値を示すフーリエ係数を0としてフーリエ合成を行なった。なお、ブイの応答関数による修正はFFTの第1段階で行なった。このようにして求められた水面波形 $\eta(t)$ から波高および周期を求めた。

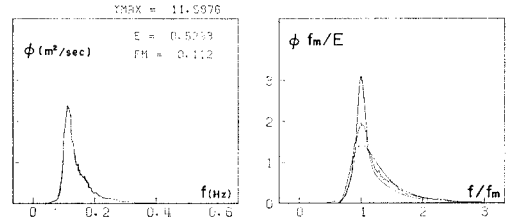
3. 結果および考察

3.1 海洋波のスペクトル

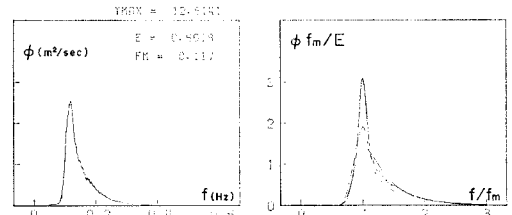
パワー・スペクトルは各データシリーズの1ブロックないしは5ブロックの標本平均を行なった後21本の移動平均がほどこされて求められた。したがって求められたパワー・スペクトルの自由度は42~210, Nyquist frequency $f_N=1.25$ Hz, 分解能 $\Delta f_0=1.22 \times 10^{-3}$ Hz, フィルター幅 $\Delta f_0=0.026$ Hzである。ただし、データ No. 213 のみは $f_N=1.5$ Hz, $\Delta f_0=1.46 \times 10^{-3}$ Hz, $\Delta f_0=0.031$ Hzである。今回得られたスペクトルの大部分は発生域内の風波のスペクトルである。その代表的な例が図—2, 3, 4, 5 および 6 に示されている。なお、右側は $\phi f_m/E = \phi \cdot (f/f_m)$ の形に規格化したもので、スペクトルの標準形として Pierson-Moskowitz のスペクトル (P-M スペクトルと以下略称) および JONSWAP のスペクトル ($\gamma=3.3$) が同様に規化して比較のため示してある。ここに、 E はスペクトルの全パワー, f_m は peak frequency f_m である。図—2 は沿岸海域(玄界灘, 風速約 10 m/s)で測定されたスペクトルである。JONSWAP のスペクトル



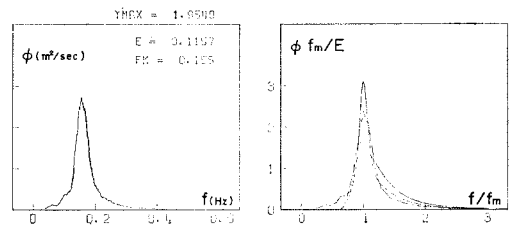
図—2 沿岸海域で測定された波浪のスペクトル (玄界灘, 風速約 10 m/s)



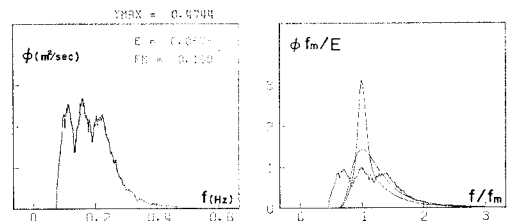
図—3 外洋で測定された波浪のスペクトル (東支那海, 風速約 13~15 m/s)



図—4 外洋で測定された波浪のスペクトル (東支那海, 風速約 13 m/s)



図—5 うねりに近い波浪のスペクトル (風速約 4 m/s)



図—6 黒潮の強流帯域で測定された波浪のスペクトル (潮岬沖, 風速約 4 m/s)

ル形に極めて近い形をしている。図-3 および 図-4 は共に外洋（東支那海，風速約 13~15 m/s）で測定されたスペクトルである。これら2つの図は AMTEX '75 の航海の際海上約 100 km 離れた2地点で同時に波を計測して得られたもので，ともに JONSWAP スペクトルと P-M スペクトルとの中間位の形をしている。図-5 は東支那海（風速約 4 m/s）で得られたスペクトルで，うねりに近い波のスペクトルである。図-6 は潮岬沖の黒潮強流帯域で測定されたスペクトルで，極めて複雑な形状を有している。

今回のデータでは P-M スペクトルに一致するものはほとんど見出されなかった。したがって，十分に発達した外洋波のスペクトルが P-M スペクトルに漸近するかどうか今回の測定結果からはよくわからない。これまでに得られたスペクトル形は P-M スペクトルと JONSWAP スペクトルとの中間的なものが極めて多い。計測されたスペクトル形は JONSWAP のスペクトル形で $\gamma \approx 1.7$ としたものに近い形のものが多いようにみえた。一般に外洋においては発達域の風波といえどもうねりと共存しているのでそのスペクトル形は極めて複雑である。

3.2 スペクトルの高周波成分を除去したデータ

風波の高周波領域の高精度の測定は非常に困難である。一方風波の大部分のエネルギーは peak frequency f_m 付近に集中し， $2f_m$ 以上の高周波領域にはエネルギ

ーはほとんど含まれていない。この点から支配的な風波の主要な統計的性質は $2f_m$ までの領域の情報から推定できると考えて，前回 $2f_m$ 以上の高周波成分を除去した風波のデータを使用して風波の統計的性質を調べた。この結果によると，高周波成分を除去した影響は $\bar{H}_z$ (zero-up cross 法による平均波高) および $\bar{H}_c$ (crest-to-crest 法による平均波高) には若干みられるが，有義波高 $\bar{H}_{z1/3}$ および有義周期 $\bar{T}_{z1/3}$ にはほとんどみられないこと， $\bar{T}_z$ および $\bar{T}_c$ は Rice の理論から十分な精度で推定できることなどがわかった。今回は $2\bar{f}$ ($\bar{f} = m_1/m_0$ ，ただし $m_n = \int_0^{\infty} \phi(f) f^n df$) 以上の高周波成分を除去したデータを使用して前回と同様な解析を試みた。 f_m の代わりに $\bar{f}$ を使用した主な理由は2~3個ピークのあるスペクトルでは計算機で機械的に f_m を決定することが困難であったためである。

各種の統計量およびその相互関係は平均値としてまとめて表-2 に示されている。前回の水槽の風波の場合とほぼ同様な結果が得られた。(1) $2\bar{f}$ までの領域に大部分のエネルギーが含まれている (95% 以上)。(2) $\bar{H}_z$ ， $\bar{H}_{z1/3}$ および $\bar{T}_{z1/3}$ はほとんど高周波成分除去の影響を受けない。(3) $\bar{T}_z$ は若干変化する (平均周期は統計的に不安定である)。(4) $\bar{T}_z$ および $\bar{T}_c$ に対して Rice の理論が原データでも十分な精度で成立している。高周波成分を除去したデータでは更により一致がみられる。

表-2 波浪の統計量の平均値および標準偏差値

	$(\bar{\eta}^2)_{2\bar{f}}/\bar{\eta}^2$	$\bar{H}_{z1/3}/\sqrt{E}$	$\bar{H}_{z1/3}/H_z$	$\bar{H}_{z1/10}/\bar{H}_z$	$\bar{T}_{z1/3}/\bar{T}_z$	$\bar{T}_z/\bar{T}_z$	$\bar{T}_c/\bar{T}_c$
平均値	0.97	3.83	1.57	1.97	1.20	0.99	0.96
標準偏差値	0.012	0.048	0.026	0.057	0.059	0.017	0.019
	$(\bar{H}_z)_{2\bar{f}}/\bar{H}_z$	$(\bar{T}_z)_{2\bar{f}}/\bar{T}_z$	$(\bar{T}_{z1/3})_{2\bar{f}}/\bar{T}_{z1/3}$	ϵ_m	$(\epsilon_m)_{2\bar{f}}$	ϵ_T/ϵ_m	$(\bar{T}_z)_{2\bar{f}}/(\bar{T}_z)_{2\bar{f}}$
平均値	1.00	1.06	1.01	0.69	0.55	0.96	1.00
標準偏差値	0.013	0.031	0.013	0.057	0.040	0.028	0.016
	r	$(\bar{r})_{2\bar{f}}$	$\bar{f}/f_m$	$1/f_m \bar{T}_z$	$1/\bar{f} \bar{T}_z$	$1/f_m \bar{T}_{z1/3}$	$(\bar{T}_c)_{2\bar{f}}/(\bar{T}_c)_{2\bar{f}}$
平均値	0.59	0.49	1.25	1.33	1.06	1.11	1.00
標準偏差値	0.077	0.071	0.123	0.147	0.024	0.013	0.016

$\bar{H}_z, \bar{T}_z$: zero-up cross 法による平均波高および平均周期

$\bar{T}_c$: crest-to-crest 法による平均周期

$\bar{H}_{z1/3}, \bar{T}_{z1/3}$: 有義波高および有義周期

$\bar{H}_{z1/10}$: 1/10 最大波高

$E = \bar{\eta}^2$: total energy

$\bar{T}_z = \sqrt{m_0/m_2}$, $\bar{T}_c = \sqrt{m_2/m_4}$, $\epsilon_m = \sqrt{1.0 - m_2^2/m_0 m_4}$, $\epsilon_T = \sqrt{1.0 - (\bar{T}_c/\bar{T}_z)^2}$

($m_n = \int_0^{\infty} \phi(f) f^n df$, $\phi(f)$: パワースペクトル)

r : 波高と周期との相関係数

f_m : スペクトルの peak frequency

$\bar{f} = m_1/m_0$

($)_{2\bar{f}}$: $2\bar{f}$ 以上の高周波成分を除去したデータを使用して求めた値

(5) $\bar{T}_z \bar{f}$ は原データでも極めて安定した値 (1.06) をとる. 高周波成分を除去すれば $\bar{T}_z \bar{f}$ の値はほぼ 1 となる. (6) $\bar{T}_z f_m$ の平均値は 1.33 であるが, その変動は大きく標準偏差値は 0.15 である.

スペクトル幅パラメータ ϵ を測定値から求めるには高周波領域のスペクトルの形, 測器の分解能および応答等の色々な問題が含まれている. 今回の ϵ の値はおりかえし周波数 $f_N = 1.25 H_z$ (データ No. 213 のみ $f_N = 1.5 H_z$) のスペクトルから求めたものである. ϵ の値は 0.5~0.8 に散布し, 平均値は 0.69 (標準偏差値=0.057) で, $2\bar{f}$ cut から求めた ϵ の値 ($\epsilon_{2\bar{f}} = 0.4 \sim 0.7$) に散布し, 平均値は 0.55 (標準偏差値=0.040) である.

3.3 波高と周期との結合分布

前回風洞水槽の風波のデータを使用して波高と周期との結合分布を調べた. $2f_m$ 以上の高周波成分を除去すれば Longuet-Higgins の理論⁵⁾との一致はかなり良好であることを報告した. 今回の結果も前回と同様な結果を与える. 図-2 から 図-6 の代表的なスペクトルに対応する結合分布が 図-7 から 図-10 までに示されている. 波高および周期ともそれぞれ平均波高および平均周期で無次元化されている. 図の右側の下の 2 図が T_z のヒストグラムで, 左側が Longuet-Higgins の理論との比較を示し, 右側が T^2 -Rayleigh 分布との比較を示している. 上の図の左側の図は H_z のヒストグラムで Rayleigh 分布との比較が示されている. 上の右側の図は対応するスペクトルである. スペクトル図は x 軸および y 軸をそれぞれ $f/\bar{f}$ および $\phi\bar{f}/E$ の形に無次元化して示されている. 今回の解析では高周波側にフィルターがかかって

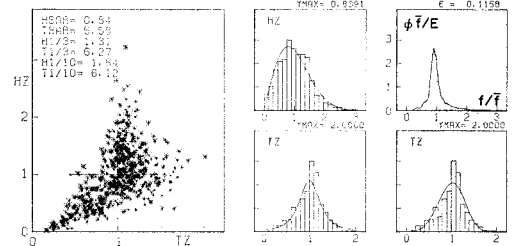


図-9 波高および周期の分布 (図-5 に対応している)

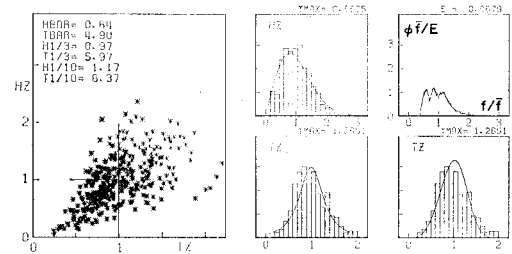


図-10 波高および周期の分布 (図-6 に対応している)

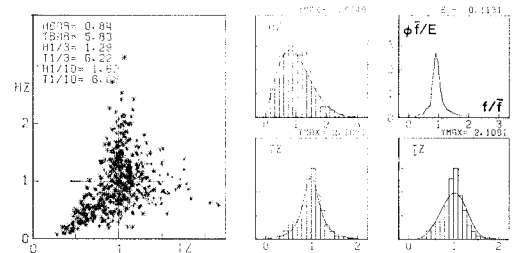


図-11 $2\bar{f}$ 以上の高周波成分を除去したデータより求めた波高および周期の分布 (図-9 に対応している)

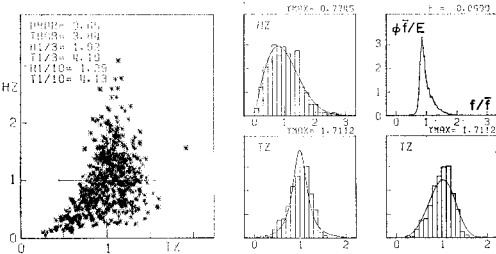


図-7 波高および周期の分布 (図-2 に対応している)

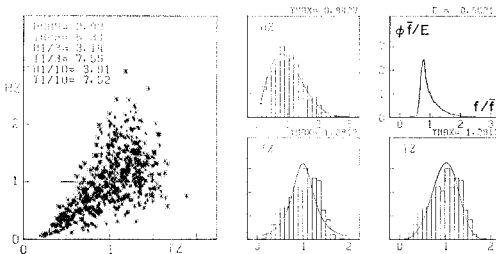


図-8 波高および周期の分布 (図-4 に対応している)

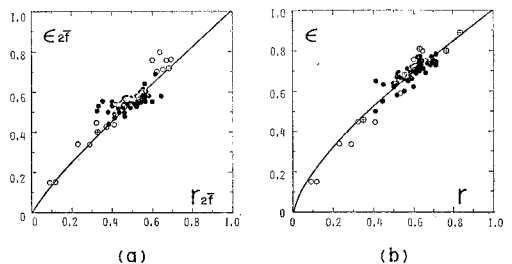


図-12 波高と周期との相関係数 r とスペクトル幅パラメータ ϵ との関係. ● は ϵ および r の平均値の算出に使用されたデータ, ⊕ は平均波高が 0.5m 以下あるいはスペクトル形が非常に複雑であるため各種の平均量を求める際にはずしたデータ. (a) は $2\bar{f}$ 以上の高周波成分を除去したデータを使用したもので, 曲線は $\epsilon_{2\bar{f}} = r_{2\bar{f}}^{0.86}$. (b) は原データを使用したもので, 曲線は $\epsilon = r^{0.70}$.

いるためか、 $2\bar{f}$ cut の影響は少ない。 $2\bar{f}$ cut の効果を示す一例が 図-11 に示されている。全体的には Longuet-Higgins の理論との一致が良好であるが、周期に関しては T^2 -Reyleigh 分布もそれほど悪くはない。

これらの図からみると明らかに H - T には相関が存在することがわかる。 H - T の相関係数 r を求めた結果、その平均値が、原データについては、 $\bar{r}=0.59$ 、 $2\bar{f}$ 以上の高周波成分を除去したデータについては $(\bar{r})_2\bar{r}=0.49$ と得られた。その値は変動し、スペクトルの集中度と関係がありそうに思われたので相関係数 r とスペクトル幅パラメータ ϵ との関係を調べた。結果は 図-12 に示されている。合田⁹⁾は以前造波機で各種のスペクトル形を有する波を起こし、そのデータを用いて両者の関係を調べ、 r と ϵ とがほぼ線型な関係にあることを示している。合田のデータの 1 部が、記号をかえて図中に示されている。これより、 ϵ が小さくスペクトルが narrow である場合には H と T との相関は小さくなり、逆に ϵ が大きく複雑な形のスペクトルでは H と T との相関が大きくなることが分る。

謝辞： 本研究に使用した海洋波のデータは、応用力学研究所が、昭和 46 年から 48 年にかけて実施した第一次の臨時事業「海洋波の計測法の開発研究」および引き続いて昭和 49 年から 52 年にかけて実施した第 2 次臨時事業「海上実験による海洋観測ステーションの開発研究」において得られたもの、さらに、日本造船研究協会が実施したプロジェクト「実船搭載用波浪計に関する研究」ならびに GARP の一環として実施された国際共同プロジェクト「AMTEX '75」等に参加して得られたものである。これらの各プロジェクトは、極めて多くの人々の共同のものに実施されたものであり、したがって

今回使用した波浪データも数え切れないほど多くの方々との共同作業のもとに得られたものである。各プロジェクトの関係者の方々に心より感謝する次第である。

また、観測船の利用に際しては、東京大学海洋研究所、東海大学海洋学部、運輸省航海訓練所、三井海洋開発 K K、芙蓉海洋開発 K K 等にお世話になった。関係者ならびに船員の方々に謝意を表わします。また、この原稿のとりまとめに際しては、江藤賢次技官、田中道芳技官ならびに北條万寿代さんの助力を得た。

今回の研究は、昭和 52 年度の文部省の科学研究費(自然災害特別研究“異状波浪の予測に関する研究”)の援助を受けて行われ、ぼう大な海洋波のデータ解析はすべて、応用力学研究所の電子計算機 FACOM 230-48 を使用して行われた。

参 考 文 献

- 1) 光易 恒・田才福造・栖原寿郎・水野信二郎・大楠丹・本多忠夫・力石国男・高木幹雄・肥山 央：海洋波の計測法の開発研究 (1)，九州大学応用力学研究所所報，第 39 号，pp. 105-181，1973。
- 2) Mitsuyasu, H. *et al.*: Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Phys. Oceanogr. **5** (4): 750-760, 1975。
- 3) 光易 恒・水野信二郎・本多忠夫・力石国男：海洋波の方向スペクトルについて，第 20 回海岸工学講演会論文集，pp. 435-439，1973。
- 4) 本多忠夫・光易 恒：風波の波高と周期との結合確率分布について，第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 83-87，1977。
- 5) Longuet-Higgins, M. S.: On the Joint Distribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves, J. Geophys. Res., Vol. 80, No. 18, pp. 2688-2694, 1975。
- 6) 合田良実：波浪の統計的性質に関する数値実験，港湾技術研究所報告，第 9 巻，第 3 号，pp. 3-57，1970。