

御前崎沖波浪観測における 多峯型方向スペクトル波の出現頻度特性

OCCURRENCE CHARACTERISTICS OF DIRECTIONAL RANDOM WAVES
WITH MULTI-PEAKS OBSERVED OFF OMAEZAKI

高山 知司¹・高橋 英紀²・永井紀彦³

Tomotsuka TAKAYAMA, Hidenori TAKAHASHI and Toshihiko NAGAI

¹ フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

² 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

³ 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 海象調査研究室長 (〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

The results of the spectral analysis for field wave data indicate that a lot of wave spectra show multi-peaked forms. The multi-peaked spectral waves affect the tranquility in a harbor, the construction plan of marine structures and the motion of a moored ship. However, the characteristics of multi-peaked spectral waves have not been well known. The present paper investigates the occurrence characteristics of directional random waves with multi-peaks through the statistical analysis of directional spectra. The directional spectra are computed from field wave data observed off Omaezaki for one year. The appearance probability of multi-peaked spectra occupies more than 30% on yearly average and the correlation analysis shows that the correlation is high between the significant wave heights of short and long wave groups which are components of multi-peaked spectral waves.

Key Words : Directional random waves, multi-peaked spectra

1. まえがき

実際の海の波は一波一波の波高と周期が異なる不規則波である。このような不規則波の表現法として、単一の波高、周期および波向で代表させる方法がある。また、不規則波が無数の成分波で構成されていることを考慮して、成分波のエネルギーが周波数や波向に対してどのように分布しているかを示すスペクトルで、不規則波を表そうとする方法もある。前者を代表波法といい、後者をスペクトル法という。代表波としてよく用いられるのが有義波である。また従来、スペクトルといえば、成分波のエネルギーを周波数だけの関数として分布を求めた周波数スペクトルが主であったが、近年、観測機器が進歩し、周波数と波向両方に対してエネルギー分布を示す方向スペクトルが求められるようになった。ただし、波浪の特性を表すに当たっては、代表波法によって波高、周期および波向を用いて示すのが簡明である。また現在では、有義波の諸元とスペクトルとの関係が明らかにされ、スペクトルから有義波

が推定できるようになっている。

近年、多くの波浪観測によって方向スペクトルの解析が進み、2つ以上のスペクトルピークを持つ多峯型方向スペクトル波が想像以上に多いことがわかってきている¹⁾。つまり波浪は、単一の特性の波群で構成されているわけではなく、波向の異なる2つ以上の波群が重なってできている場合もあることがわかってきた。海の波の方向スペクトル形が単峯型で表される場合には、有義波の波高や周期はスペクトルから推定することができる。しかしながら、多峯型スペクトル波では単峯型のスペクトル波から有義波を求める手法をそのまま適用したのでは、定義から求めた有義波の波高とはずれる可能性がある。

多峯型方向スペクトル波を単一の代表波で表すことによって生じる問題点として、港内静穏度解析や施工計画、係留船舶の動揺があげられる。どのくらいの波高の波群が、どの方向から来襲するかで港内静穏度は大きく異なってくる。したがって、2つ以上の波群の波

向を単一の波向に置きかえて求めると、実際の静穏度とは大きく異なる値を推定することになる。防波堤などの施工計画においても、ケーソンの曳船や作業船の稼働に波浪の影響が強い。作業船は小さいので数秒の短周期の波によって大きく動揺し、危険性が增大する。また、船舶の係留に対して波の周期は非常に重要で、係留船舶の動揺は船の大きさや係留方法などによって変化するが、一般的に周期が長いほど大きくなる。したがって、うねりの影響を受けやすい港では、うねりの方向を把握することは非常に重要である。その他に、波の多峯性は漂流油の方向にも影響するものと考えられる。

そこで本研究では、実海域として御前崎沖の波浪を対象として得られた方向スペクトルをもとに、多峯型方向スペクトル波の出現特性を把握することを目的とする。

2. 波浪資料と多峯型方向スペクトルの定義

(1) 波浪観測点とその資料

本研究に使用する解析資料の方向スペクトルは、静岡県御前崎沖約 2.5km の地点に設置された海象計によって得られたものである。海象計の設置水深は -22.6m であり、海象計の位置図を図-1 に示してある。北から西にかけては陸地に近く、この方向からの波はほとんどないと考えられる。また、東側約 60km のところに伊豆半島があり、北東から東にかけて外洋に面していない。唯一外洋に面しているのは、南から南東にかけてであるが、南側には岩礁があり、南からの波浪は碎波するものが多いと考えられる。

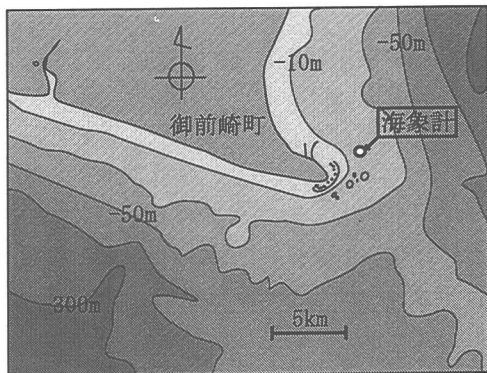


図-1 海象計の位置図

計測期間は 1997 年 4 月 1 日から 1998 年 3 月 31 日の 1 年間であり、8 時間ごとに方向スペクトルが求められている。解析に用いた方向スペクトルの数は約 1000 個で、その一例を図-2 に示している。海象計とは、海底に設置した超音波送受波器から異なる 3 方向に超音波を放射し、そのドップラーシフトから水粒子速度と鉛直上方の海面の水位変動を測定する装置である。これ

らの測定時系列データをもとに拡張最尤法 (EMLM) を用いて波浪の方向スペクトルを求めている²⁾。

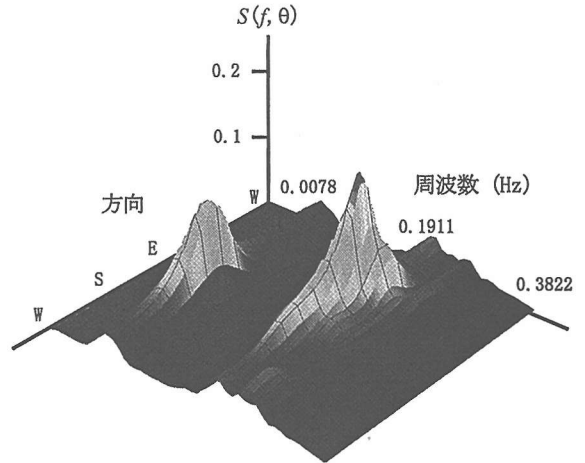


図-2 方向スペクトルの例

(2) 多峯型方向スペクトルの定義とその表示法

波浪の方向スペクトルにおいて、スペクトルのピークが 1 つだけ存在するものを単峯型方向スペクトル、2 つ以上のピークを持つものを多峯型方向スペクトルと呼ぶことにする。大量の方向スペクトルに関して、客観的に単峯型か多峯型かを判断するためには、基準を設定し、計算機によって高速に処理することが必要である。

多くのスペクトルピークが存在しても、それが小さい場合にはそのピークに対応する波群の波高は小さく、それが全体の波群に与える影響は小さい。そこで本研究では、多峯型方向スペクトル波は、方向スペクトルにおいて最大値の 1/2 より高いピークが他に存在する場合とし、これ以外を単峯型とした。3 つ以上のピークを持った多峯型方向スペクトルは非常に少なかったため、多峯型はすべて双峯型とした。

また、双峯型方向スペクトル波については、2 つのスペクトルピークの間でスペクトルが最小になっている周波数を境にして、低周波数側を長周期成分、高周波数側を短周期成分として区別した。その長周期と短周期の成分をそれぞれ単一の有義波の波高と周期、平均波向で代表させ、これらの値の出現特性について調べた。ただし、有義波高 $H_{1/3}$ は次式 (1) で求めた。

$$H_{1/3} = 4.004 \sqrt{\iint_D S(f, \theta) df d\theta} \quad (1)$$

ここで積分領域 D は、 $D = \{(f, \theta) | 0 \leq f \leq \infty, 0 \leq \theta < 2\pi\}$ である。

有義波周期は次式 (2) に示すように、ライス (Rice)

理論から求まる平均周期に 1.2 を乗じて求めた。

$$T_{1/3} = 1.2\bar{T} = 1.2 \frac{\sqrt{\iint_D S(f, \theta) df d\theta}}{\sqrt{\iint_D f^2 S(f, \theta) df d\theta}} \quad (2)$$

平均波向は次式 (3) で求めた。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \frac{M_{01}}{M_{10}} \quad (3)$$

ここに、 M_{01} と M_{10} は式 (4) で与えられる。

$$\begin{cases} M_{01} = \iint_D S(f, \theta) \sin \theta d\theta df \\ M_{10} = \iint_D S(f, \theta) \cos \theta d\theta df \end{cases} \quad (4)$$

波向に平均波向を使用する理由は、方向スペクトルが単一方向に分布している場合には適切な波向が算定でき、全平面 (−180~180 度) で求められるからである。注意したいのは、平均波向は 2 方向から波が来襲している時には 2 つの波向の中間方向に平均波向が算定される性質があることである。しかしながら、方向スペクトルを長周期と短周期に分割し、分割後の各方向スペクトルは、ほぼ単峰型方向スペクトルになるので、このような問題は生じないと考えられる。

3. 多峰型方向スペクトル波の出現特性

(1) 多峰型方向スペクトル波の出現率

多峰型方向スペクトル波における短周期波群は海象計付近の海域で発生した風波で、長周期波群は外洋における気象擾乱によって発生した風波が伝播してきたうねり性の波だと予測される。このような要因で起きる多峰型方向スペクトル波がどの程度の頻度で現れるか、月別の多峰型方向スペクトル波の出現率を求めてみた。それを示したのが図-3 である。この図から、多峰型方

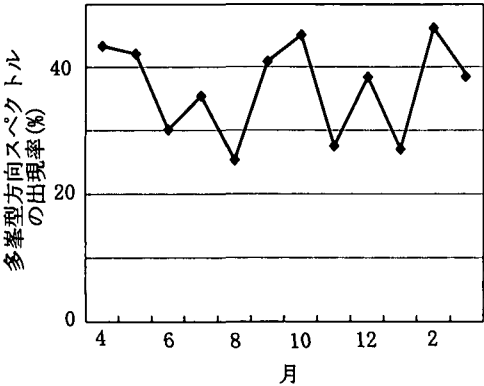


図-3 多峰型方向スペクトル波の月別出現率

向スペクトルは全方向スペクトルに対して、年間平均約 35 % で発生していることがわかる。最も多く多峰型

方向スペクトル波が発生していたのは 2 月で、その出現率は 46.2 % で、半分近くが多峰型スペクトルであった。一方、最も発生しなかったのは 8 月で、出現率は 25.3 % であった。また、2~5 月の春ごろと 9,10 月の秋に、多峰型方向スペクトル波が 38 % 以上発生しており、他の月に比べると比較的多く発生していることがわかる。2~5 月にかけては、中国大陸から東方へ移動する低気圧がわが国の太平洋沿岸を数多く通過する季節であり、9~10 月は南方で発生した台風が東海から関東によく来襲する季節である。したがって、多峰型方向スペクトル波を誘発する気象的な要因としては、春の中国大陸からくる移動性の低気圧や秋の台風が考えられる。つまり、外洋で台風や低気圧によって発生した波浪の長周期成分だけが伝わり、観測された方向スペクトル波の長周期波群となっていると考えられる。また、海象計付近の風によって発生した波浪が短周期波群を構成していると考えられる。

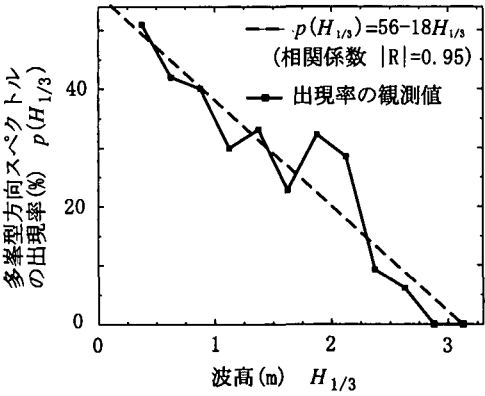


図-4 多峰型方向スペクトル波の波高別出現率

波高別の多峰型方向スペクトル波の出現率を示したのが図-4 である。ここでいう波高とは方向スペクトル波を単峰型方向スペクトル波として算定したものである。この図から、観測データの多い波高 1.5m 以下では、直線的に出現率が低下している。ただし、波高 3m 以上では観測データはほとんどなく、出現率は 0 % となった。最小 2 乗法により回帰直線を求めたところ、相関係数は −0.95 で式 (5) のようになった。

$$P(H_{1/3}) = 0.56 - 0.18H_{1/3} \quad (5)$$

波高が大きくなるにつれて、多峰型方向スペクトル波の出現率が低くなる理由は、次のように考えられる。波高が大きいということは、方向スペクトルのピークが大きいと言い換えることができる。そして、ある主波群の波高が大きいほど 1 つのピークが突出し、他のピークが相対的に低くなる。その結果、多峰型方向スペクトルの定義から考えて、1 つの山が突出するほど、その 1/2 の高さを持つピークも高くなり、それによって他の

高いスペクトルピークの存在発生が少なくなり、結果的に単峰型方向スペクトルと判定されることが多くなったと考えられる。

(2) 代表波浪諸元特性

a) 波群代表波の波浪諸元の出現頻度分布

多峰型方向スペクトル波の周期の出現頻度分布を図-5と6に示す。図-5に示す長周期成分の周期 $T_{1/3}^I$ は、10～12s をピークにして7～16s に広く分布しているのに対して、図-6に示す短周期成分の周期 $T_{1/3}^{II}$ は、4～8s に分布しており4～6s に半分近くが集中している。また、長周期成分と短周期成分は、ほぼ周期7sで分けることができる。つまり単純に周期だけを見て判断をすると、長周期波群は主にうねり性の波群で構成されており、短周期波群は風波であると考えられる。

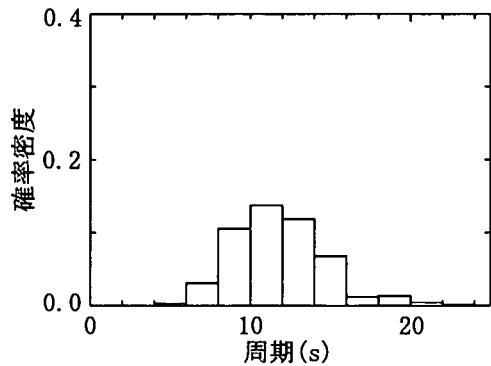


図-5 長周期成分の周期の出現頻度分布

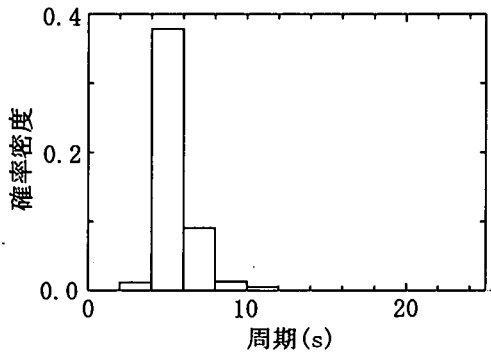


図-6 短周期成分の周期の出現頻度分布

多峰型方向スペクトル波の波向の出現頻度分布を図-7に示す。図中の破線と実線は、それぞれ長周期成分と短周期成分の平均波向の出現分布を示している。図-7から、多峰型方向スペクトル波の長周期成分の波向は16方位でいうと、SEの方向をピークにほぼESE～SSEの3方向に限られている。ESE～SSEの方向は、御前崎沖の海象計の位置から考えて、唯一外洋から波浪が直接来襲する方向である。したがって、これも長周期成分の波群はうねりであるということを示していると考え

られる。また図-7から、短周期成分の波向は、SSEをピークにENE～SSW方向の広い範囲にわたっており、短周期波群は海象計付近で発達した風波であると考えられる。

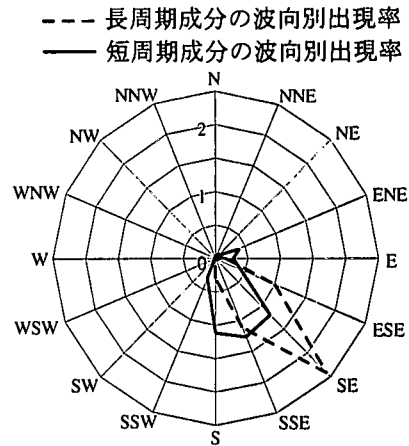


図-7 多峰型方向スペクトル波の波向の出現頻度分布

b) 波群代表波の波高と周期の相関

波群代表波の波浪諸元間の相関のうち、波高と周期の相関について述べる。多峰型方向スペクトル波における波高と周期をプロットしたのが図-8である。図中

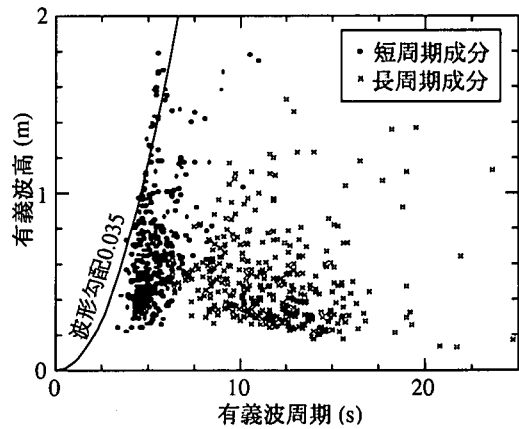


図-8 多峰型方向スペクトル波の波高と周期の相関図

の「・」と「×」で示したのは、それぞれ短周期成分と長周期成分である。図-8の実線で示したのは、式(6)で表される波形勾配が0.035のグラフである。

$$\begin{cases} \frac{H_{1/3}}{L_0} = 0.035 \\ L_0 = \frac{gT_{1/3}^2}{2\pi} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 L_0 は沖波の波長である。波形勾配が0.035の曲線を描いたのは、風波の波形勾配が観測値から一般に0.03-0.04付近であることを考え、多峰型方向スペクトル波の短周期波群が風波であることを、判断するためである。

多峯型方向スペクトル波の短周期成分について考えると、波高 $H_{1/3}^{\text{II}}$ がある程度大きいと、ほぼ式 (6) で表される曲線にのっていることがわかる。これから短周期波群は、ほぼ風波であることが予測される。波高が小さいと長周期側にずれているのは、短周期成分にも比較的長周期の波群が少し含まれているためだと考えられる。つまり、波高が大きいときは、短周期波群のエネルギーは大きく、短周期成分が含んでいる長周期の波群の影響は、さほどないと考えられる。それに対して、波高が小さいときは、短周期波群のエネルギーは小さく、含んでいる長周期の波群が無視できなく、影響が出たと考えられる。また、図-8において、多峯型方向スペクトル波の短周期成分のプロットは、ある直線付近に分布しているように見える。そこで、この波高と周期に対して最小2乗法を用いて、回帰直線と相関係数を計算してみた。すると回帰直線は、 $T_{1/3}^{\text{II}} = 1.47H_{1/3}^{\text{II}} + 4.42$ であった。長周期成分と短周期成分の波高や周期、波向の間における相関係数を示したのが表-1である。これよ

表-1 各波浪諸元間の相関係数

	$H_{1/3}^{\text{I}}$	$H_{1/3}^{\text{II}}$	$T_{1/3}^{\text{I}}$	$T_{1/3}^{\text{II}}$	$\bar{\theta}^{\text{I}}$	$\bar{\theta}^{\text{II}}$
$H_{1/3}^{\text{I}}$	1	0.76	-0.12	0.23	-0.10	-0.32
$H_{1/3}^{\text{II}}$	0.76	1	0.21	0.47	-0.10	-0.41
$T_{1/3}^{\text{I}}$	-0.12	0.21	1	0.74	0.10	0.11
$T_{1/3}^{\text{II}}$	0.23	0.47	0.74	1	-0.01	0.06
$\bar{\theta}^{\text{I}}$	-0.10	-0.10	0.10	-0.01	1	0.38
$\bar{\theta}^{\text{II}}$	-0.32	-0.41	0.11	0.06	0.38	1

$H_{1/3}^{\text{I}}$: 長周期成分の波高 $H_{1/3}^{\text{II}}$: 短周期成分の波高
 $T_{1/3}^{\text{I}}$: 長周期成分の周期 $T_{1/3}^{\text{II}}$: 短周期成分の周期
 $\bar{\theta}^{\text{I}}$: 長周期成分の波向 $\bar{\theta}^{\text{II}}$: 短周期成分の波向

り短周期成分における波高と周期の相関係数は0.47であり、ある程度相関が認められることがわかった。表-1から多峯型方向スペクトル波の長周期成分の波高と周期の相関係数については、短周期成分と比べて-0.12と低く、長周期成分の波高に対して周期は特定の傾向をもっていないことがわかる。また、うねりを発生させる気象擾乱の観測点からの距離が遠いほど、より長周期波群だけが観測点に届き、周期が長くなるのに対して、波高は気象擾乱が波浪に与えたエネルギーに左右される。つまり、うねりの周期と波高には相関が認められにくい。これから長周期波群はうねりであると考えられる。

c) 多峯型スペクトル波の長・短周期成分間の相関
 多峯型方向スペクトル波の長周期成分の波高 $H_{1/3}^{\text{I}}$ と短周期成分波高 $H_{1/3}^{\text{II}}$ の間の相関について考えてみる。

$H_{1/3}^{\text{I}}$ と $H_{1/3}^{\text{II}}$ との相関をプロットしたのが、図-9である。 $H_{1/3}^{\text{I}}$ と $H_{1/3}^{\text{II}}$ との大きさの傾向を比較するため、45度線

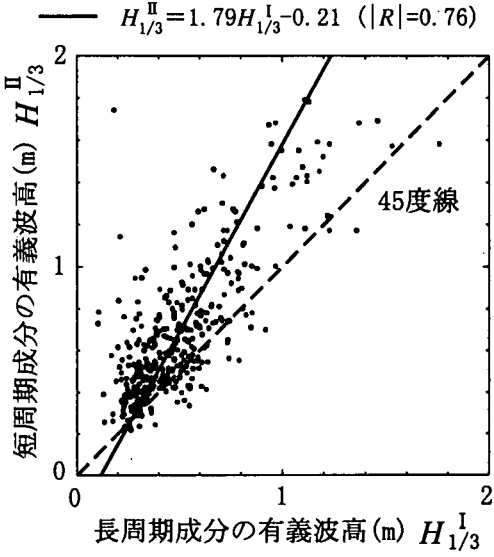


図-9 多峯型方向スペクトル波の波高間の相関図

を点線であわせて描いている。この図から、大半が45度線より上側にプロットされており、 $H_{1/3}^{\text{I}}$ の方が $H_{1/3}^{\text{II}}$ より小さい傾向がわかる。また、この2つの波浪諸元に対する相関係数は、0.76と他の波浪諸元間に比べ大きい相関があり、 $H_{1/3}^{\text{I}}$ が大きくなれば、 $H_{1/3}^{\text{II}}$ も大きくなる傾向がある。ただし、回帰直線は $H_{1/3}^{\text{II}} = 1.79H_{1/3}^{\text{I}} - 0.21$ であり、図中に実線で示してある。この相関の第1の原因は、多峯型方向スペクトル波の定義にあると考えられる。つまり、ある方向スペクトルにおいて1番のピークが高いほど、その1/2の値も大きくなる。したがって、2番目のピークは、1番目のピークの1/2以上であるためには、必然的に高くならざるを得ない。このことから、一方の波高が大きいほど、もう一方の波高も大きくならなければならない。その結果、 $H_{1/3}^{\text{I}}$ と $H_{1/3}^{\text{II}}$ との間に正の相関が生じると説明できる。そして第2の原因は、波浪を発生させる気象擾乱にあると考えられる。つまり、外洋において大きな波高のうねりを発生させるような気象擾乱が、観測地点付近に近づいてきたときに大きな波高の風波も発生させるためだと思われる。このような原因にもよって長周期成分の波高が大きければ短周期成分の波高も大きくなると考えられる。

多峯型方向スペクトル波の長周期成分と短周期成分の周期 $T_{1/3}^{\text{I}}$ と $T_{1/3}^{\text{II}}$ の相関を図-10に示している。これについても、相関係数は0.74と他の波浪諸元と比べて大きい値を示しており、相関が認められる。回帰直線は $T_{1/3}^{\text{II}} = 0.39T_{1/3}^{\text{I}} - 0.77$ であり、図中に実線で示している。この図から、短周期成分の周期が長いとき、長周期成分の周期も長いことがわかる。一方、短周期成

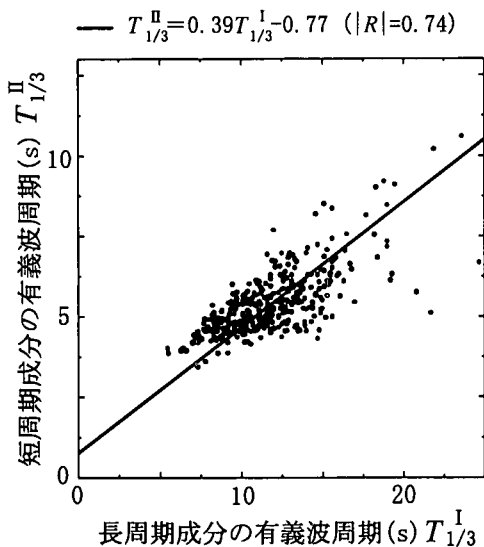


図-10 多峯型方向スペクトル波の周期間の相関図

分の周期が短いとき、長周期成分の周期は長いものから短いものまで観測されており、必ずしも比例関係にはないことがわかる。例えば、短周期成分の周期が5sのときに、長周期成分の周期は7sから20sぐらいのものまでである。この周期間の特性の理由は以下のように考えられる。観測点において多峯型方向スペクトル波が観測されるためには、風波の周期が長くなるにつれて、うねりの周期がさらに長くなければならない。したがって、短周期成分の周期が長くなるにつれて、長周期成分の周期も長くなる。しかしながら、短周期成分の周期が短い場合、長周期成分の周期は、短周期成分の周期より大きければよいので、広い範囲の周期をとり得る。したがって、短周期成分の周期が短いとき、長周期成分の周期は長いものから短いものまで観測される。

d) 波群代表波の波高と波向の相関

表-1によると多峯型方向スペクトル波の短周期成分の波高 $H_{1/3}^II$ と波向 θ^II においては相関係数が -0.41 であり、少しではあるが負の相関が認められる。つまり、短周期成分の波浪が来襲する E から S の方向を考えると、S 側の波向の波浪ほど、波高が小さくなっている。この原因は、波の碎波による影響だと考えられる。観測点である海象計の位置の南側には岩礁があり、南からの波は碎波すると考えられる。つまり、碎波することにより波のエネルギーの相当部分が消散されるため、南からの波の波高が小さくなっていると考えられる。

4. あとがき

御前崎沖における方向スペクトル波を解析した結果、多峯型方向スペクトル波の出現特性は以下のようにとりまとめることができる。

- i) 多峯型方向スペクトル波は春と秋において多く発生しており、それぞれの原因は移動性の低気圧と台風と考えられる。また、単峯型として計算された波高が大きくなるにつれて、多峯型方向スペクトル波の出現率は直線的に低くなる。
- ii) 多峯型方向スペクトル波の長周期成分と短周期成分はほぼ周期 7s でわけられる。
- iii) 短周期成分の波高と周期は相関が認められる。ただし、相関係数は 0.47 であり、これは短周期波群が主に風波であるためだと考えられる。
- iv) 長周期成分と短周期成分の波高間の相関係数は 0.76 で、他の波浪諸元間に比べ比較的大きな相関が認められた。原因は多峯型方向スペクトルの定義によるものと、波浪の発生要因が同一の気象擾乱である可能性によるもの両方が考えられる。また、周期間の相関係数は 0.74 であった。この相関の原因は、短周期成分の周期に対して、長周期成分の周期の範囲に制約が生じるためだと考えられる。
- v) 長周期成分の波向はほぼ一方向に限られているが、短周期成分の波向は広い範囲にまたがっている。また、波向が南向になるほど岩礁の影響で碎波して波高が小さくなる傾向がある。
- vi) 波高や周期、波向から総合して考えると、多峯型方向スペクトル波の長周期波群は主にうねりで、短周期波群は主に風波であると考えられる。

今後は、他の海域の多峯型方向スペクトル波についても調べ、多峯型方向スペクトル波の出現特性と海域との関連について明らかにするとともに、港内静穏度に与える多峯型方向スペクトルの影響について定量的に調べるつもりである。

参考文献

- 1) Soares, C.G.: On the occurrence of double peaked wave spectra, Ocean Engineering 18, pp.167-171, 1991
- 2) 高山知司、橋本典明、永井紀彦、高橋智晴、佐々木弘: 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について、第39回海岸工学講演会論文集、pp.176-180、1992