

# 御前崎沖における多峯型方向スペクトル波の出現特性

高山 知 司\*・高橋 英 紀\*\*・永井 紀 彦\*\*\*

## 1. はじめに

海の波のような不規則な波群に対しても、一つの代表波でその特性を表すことが行われている。代表波としては有義波が一般的に用いられ、その波高と周期、平均波向で代表されている。しかしながら、代表波の諸元だけでは、不規則な波群の特性を表すことはできず、スペクトル解析によって詳細な特性を明らかにする必要がある。

単峯型スペクトル波の場合には、多くの調査結果に基づいてスペクトルと代表波の諸元との関係が明かにされており、代表波の諸元によって波のスペクトルを推定することも、その逆も可能になっている。一方、スペクトルが多峯型の場合には、波のスペクトルから代表波の諸元を求めても、その諸元から波のスペクトルを求めることはできない。また、無理に代表波の諸元からスペクトルを求めたとしても、その形状は単峯型のスペクトル形になってしまい、特性は大きく異なってしまう。このような意味からも多峯型スペクトル波を一つの代表波の諸元で表す意義も薄れる。しかしながら、多峯型スペクトル波を的確に表現する方法がないために、単峯型と同様に一つの代表波で表されているのが現状である。

港内静穏度や港湾・海岸構造物の施工計画、船舶係留条件の設定などの解析に当たっては、現状では代表波の諸元で表された波浪の統計解析結果を用いている。この波浪統計には、単峯型だけではなく多峯型のスペクトル波も含まれているが、すべて単峯型のスペクトル波として解析されてきた。

近年における波浪統計解析によれば、想像以上に多峯型スペクトル波が発生していることが明らかになってきている。このような状況においてもすべての波を単峯型として取り扱うと解析結果に大きな誤差を含む可能性が高い。そのために、多峯型スペクトル波は多峯型スペクトル波として取り扱うことが重要になる。しかしながら、現状では、多峯型スペクトル波を波浪統計解析の中に取

り組む手法が明確になっていない。

そこで、本研究においては、実海域における多峯型スペクトル波の出現特性を御前崎沖の波浪観測データを用いて調べるとともに、この出現特性を考慮に入れて、そのような特性の波を統計的に再現する手法について検討を行った。そして、新たな手法を提案するとともに、その手法による多峯型スペクトル波の再現精度について明らかにした。

## 2. 解析資料と多峯型方向スペクトルの定義

### (1) 解析資料

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 2.5 km 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 -22.6 m であり、海象計の位置を図-1 に示している。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、南からの波浪は砕波するものが多いと考えられる。

観測期間は 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を測定するとともに、鉛直上方の海面の水位変動を測定する装置である(高山ら, 1992)。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) 多峯型方向スペクトルの定義

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、多峯型

\* フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所

\*\* 学生会員 京都大学大学院工学研究科

\*\*\* 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

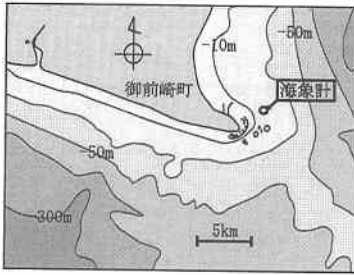


図-1 海象計の位置図

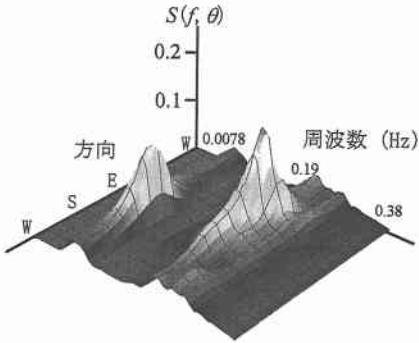


図-2 方向スペクトルの例

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た。

### 3. 多峯型方向スペクトル波の出現特性

#### (1) 多峯型方向スペクトル波の月別出現率

図-3に月別の多峯型方向スペクトル波の出現率を示してある。この図から、年間平均約35%多峯型方向スペクトル波が発生しており、最も多く発生していたのは2月で、その出現率は46.2%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、多峯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、中国大陆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

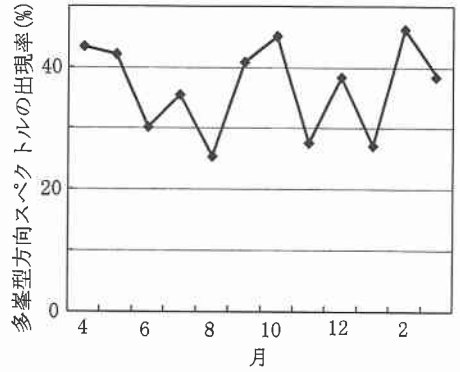


図-3 多峯型方向スペクトル波の月別出現率

たがって、多峯型方向スペクトル波を誘発する気象的な要因としては、春の中国大陆からくる移動性の低気圧や秋の台風が考えられる。

#### (2) 方向スペクトルと有義波高

方向スペクトルから得られた有義波高の出現頻度分布を図-4に示す。ここでいう波高とは、波群を1つの代表波、つまり有義波で代表させたときの波高である。この図から、波高は0.50～0.75 mをピークに、0.25 mから3 mのものまで観測されていることがわかる。また、この図には後述する方法によってあてはめた、極値II型分布(形状母数  $k=7.6$ ) もあわせて描いてある。

波高別の多峯型方向スペクトル波の出現率を示したのが図-5である。ここにおける波高は1つの有義波で代表させたものである。この図から、観測データの多い波高1.5 m以下では、直線的に出現率が低下している。ただし、波高3 m以上では観測データはほとんどなく、出現率は0%とした。このような波高増大による多峯型方向スペクトル波の出現率の減少については、Soares (1991) も示している。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で以下の式のようになった。

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

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が低くなる理由は、次のように考えられる。多峯型方向スペクトルの定義から考えて多峯型になるためには、1つの山が突出すると、もう1つのピークも高くならなければならない。しかしながら、2番目のスペクトルピークがこのように高くなることは少なく、結果的に単峯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。

#### (3) 多峯型方向スペクトル波の波浪諸元の特性

多峯型方向スペクトル波の長周期成分の周期  $T_{1/3}^L$  は、10～12 sをピークにして7～16 sに広く分布していた。また、短周期成分の周期  $T_{1/3}^S$  は、4～8 sに分布しており4～6 sに半分近くが集中していた。これより長周期成分

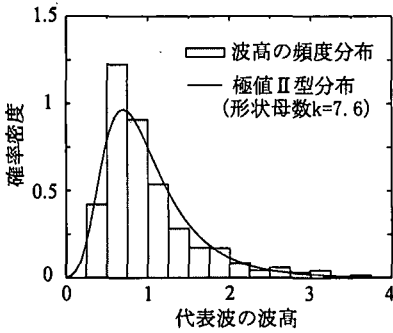


図-4 代表波高の出現頻度分布

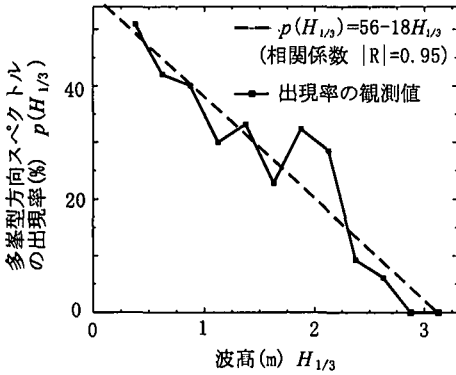


図-5 多峯型方向スペクトル波の波高別出現率

と短周期成分は、ほぼ周期7sで分けることができる。

多峯型方向スペクトル波の長周期成分の波向  $\bar{\theta}^I$  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。短周期成分の波向  $\bar{\theta}^{II}$  は、SSEをピークにENE～SSW方向の広い範囲にわたっており、東側には伊豆半島もありフェッチも短く、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。

#### (4) 波浪諸元間の相関

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。多峯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-6である。図中の「・」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-6の実線は、沖波波形勾配が0.035の線である。

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、波高がある程度大きいと、波形勾配が0.035の曲線に、ほぼのっていることがわかる。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て、短

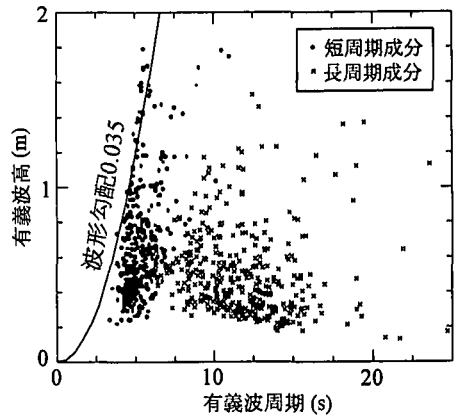


図-6 波高と周期の相関図

周期波群は風波であると推測できる。波高が小さいときは、短周期波群のエネルギーは小さくなり、含まれている比較的長周期の波群が無視できなく、長周期の方に少しずれたと考えられる。

また、図-6において、多峯型方向スペクトル波の短周期成分の周期と波高は、線形関係にあるようにみえる。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、 $T_{II}^0 = 1.47 H_{II}^0 + 4.42$ 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。

#### 4. 波浪諸元の再現

##### (1) 波浪諸元の再現方法

再現には、あてはめた分布関数に対してモンテカルロ法を使用する。モンテカルロ法によってある波浪諸元を求め、その後は条件付確率密度に対してモンテカルロ法

表-1 波浪諸元間の相関係数

|                     | $H_{I/3}$ | $H_{II/3}$ | $T_{I/3}$ | $T_{II/3}$ | $\bar{\theta}^I$ | $\bar{\theta}^{II}$ |
|---------------------|-----------|------------|-----------|------------|------------------|---------------------|
| $H_{I/3}$           | 1.00      | 0.76       | -0.12     | 0.23       | -0.10            | -0.32               |
| $H_{II/3}$          | 0.76      | 1.00       | 0.21      | 0.47       | -0.10            | -0.41               |
| $T_{I/3}$           | -0.12     | 0.21       | 1.00      | 0.74       | 0.10             | 0.11                |
| $T_{II/3}$          | 0.23      | 0.47       | 0.74      | 1.00       | -0.01            | 0.06                |
| $\bar{\theta}^I$    | -0.10     | -0.10      | 0.10      | -0.01      | 1.00             | 0.38                |
| $\bar{\theta}^{II}$ | -0.32     | -0.41      | 0.11      | 0.06       | 0.38             | 1.00                |

添字 I, II はそれぞれ長・短周期成分  
H, T,  $\theta$  はそれぞれ波高, 周期, 波向

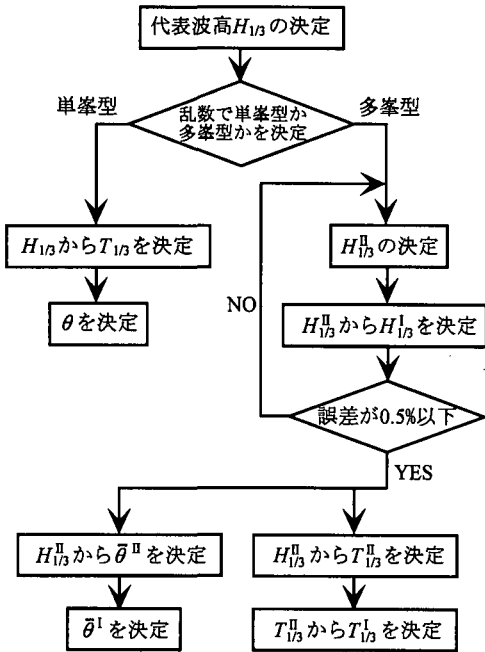


図-7 波浪諸元の再現の流れ図

を順に適用していき、連鎖的に他の波浪諸元を求めていくのが、再現の基本的な流れである。再現方法の流れ図を図-7に示している。

まず、方向スペクトルを単一の有義波で代表させたときの波高の分布関数(図-4参照)に対して、モンテカルロ法を使って波高  $H_{1/3}$  を決定する。この決定した波高に対して、式(1)から多峯型方向スペクトル波の出現率を求める。この出現率から、乱数を使って単峯型か多峯型かを決定する。

もし単峯型なら、先に決定した波高を単峯型方向スペクトル波の波高とする。また、この波高を条件とする周期の条件付確率密度関数に対して、モンテカルロ法を適用し周期を決定する。ここで条件付確率を用いたのは、波高と周期の間の相関係数が0.60で、この相関を考慮するためである。また波向については、波高や周期に対して相関が認められなかったので、波向の出現分布を独立の正規分布として波向を定めた。

次に多峯型の場合であるが、初めに短周期成分の波高  $H_{1/3}^{II}$  の分布関数に対してモンテカルロ法を適用し短周期成分の波高を決定する。 $H_{1/3}^{II}$  との相関を考慮して、決定された  $H_{1/3}^{II}$  に対する長周期成分の波高  $H_{1/3}^I$  の条件付確率密度関数にモンテカルロ法を使い、 $H_{1/3}^I$  を設定する。この多峯型方向スペクトル波の波高を求める作業を、以下の式(2)を満足するまで何度か行う。

$$0.95H_{1/3} \leq \sqrt{(H_{1/3}^I)^2 + (H_{1/3}^{II})^2} \leq 1.05H_{1/3} \quad \cdots \cdots (2)$$

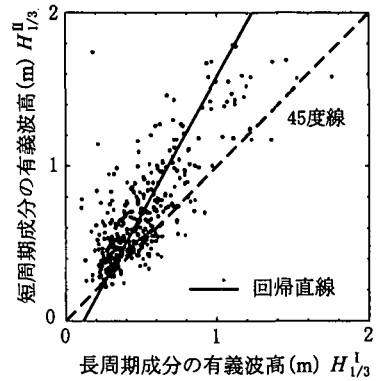


図-8 長周期・短周期の波高間の相関図

このように繰り返し計算を行う理由は、合成した多峯型方向スペクトル波の波高を、単一の代表波の波高に近くするためである。こうして、多峯型方向スペクトル波の波高が決定されれば、以下は流れ図に示すように、短周期成分の周期  $T_{1/3}^{II}$ 、長周期成分の周期  $T_{1/3}^I$ 、短周期成分の波向  $\theta^{II}$ 、長周期成分の波向  $\theta^I$  を順次設定する。ただし、長周期成分の波向に対しては、他の波浪諸元と相関が認められないので、独立させて求めた。結局、表-1の薄墨で示した低い相関係数のものについては、2つの波浪諸元は独立として取扱った。

以上の過程で1セットの波浪諸元が再現できる。この計算を繰り返し行うことによって、多数の波浪諸元を再現することができる。

## (2) 条件付確率分布について

本研究では、波浪諸元を再現する過程において、最適な分布をあてはめることを何度か行っている。あてはめる分布関数としては、極値I型、極値II型、ワイブル、正規分布を使用した。また、分布をあてはめて母数を推定する際には、最小2乗法を用いた。これは不偏性と有効性に優れており、計算方法が簡明だからである。最適プロット・ポジション公式の選択などについては、合田(1990)の方法に従った。図-4には例として、代表波の波高の分布に対して極値II型分布をあてはめたものを示している。

波浪諸元間の非独立性を考慮するために、条件付き確率を利用する。これを説明するための例として、多峯型方向スペクトル波の短周期成分の波高が  $H_{1/3}^{II}$  であることを条件にして、長周期成分の波高  $H_{1/3}^I$  を決定する方法について述べる。

図-8には長周期成分の波高と短周期成分の波高の相関図を示している。回帰直線は  $\bar{H}_{1/3}^I = 0.56H_{1/3}^{II} + 0.12$  で表される。 $\bar{H}_{1/3}^I$  は  $H_{1/3}^{II}$  のときの平均値であり、回帰直線は、 $H_{1/3}^I$  と  $H_{1/3}^{II}$  の間の平均値関係を示している。そのため、 $H_{1/3}^I$  は  $\bar{H}_{1/3}^I$  の周辺に分布することになる。この分布を示

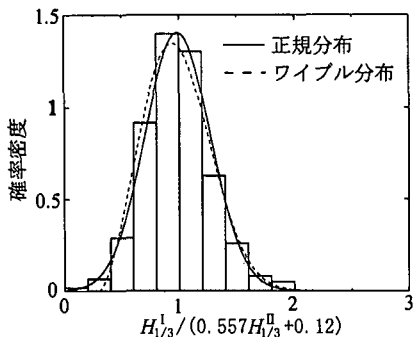


図-9 条件付確率密度関数の選定

したのが図-9である。この分布に対して、最も相関係数が高いのはワイブル分布で0.995である。しかしながら、正規分布をあてはめたときの相関係数も0.994とほとんど差がない。また、視覚的にも大差はない。そこで、正規分布は取り扱いやすいので、 $\gamma = H_{1/3}^I / \bar{H}_{1/3}^I$ として、 $\gamma$ を確率変数にもつ正規分布を次のように設定した。

$$p(\gamma) = \frac{1}{0.28\sqrt{2}} \exp\left\{-\frac{(\gamma-1)^2}{2 \times 0.28^2}\right\} \dots\dots\dots (3)$$

$H_{1/3}^I$ の値が与えられると、 $\bar{H}_{1/3}^I$ が求まる。式(3)の正規分布にモンテカルロ法を適用し、 $\gamma$ の値を求める。そして、 $\gamma$ の値から長周期成分の波高  $H_{1/3}^I$ を設定する。

単峯型方向スペクトル波の周期  $T_{1/3}$ や多峯型方向スペクトル波の周期  $T_{1/3}^I$ ,  $T_{1/3}^{II}$ , 短周期成分の波向  $\bar{\theta}^{II}$ についても、同様な方法を適用した。

### (3) 波浪諸元の再現結果

(1)で示したモデルによって、波浪諸元を再現した例を示す。ただし、再現した波浪諸元の個数は、観測データと同数の約1000個である。再現した波浪諸元と観測データより得た波浪諸元との比較を視覚的かつ定量的に行ってみた。表-2は、観測データと再現データから得られた各波浪諸元の平均値と標準偏差である。これから平均値と標準偏差は非常に近い値をとり定量的に類似することが示された。また、長周期成分の波高の出現頻度分布を比較したのが図-10である。実線が観測データ、破線が再現データである。両者はよく一致していることがわかる。

以上のように、多峯型スペクトル波の代表波諸元間の相関が明らかになると現地データを再現できることがわかった。

## 5. おわりに

本研究によって得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 多峯型方向スペクトル波は春と秋において多く

表-2 観測データと再現データの比較

|                     | 観測データ |          | 観測データ |          |
|---------------------|-------|----------|-------|----------|
|                     | $\mu$ | $\sigma$ | $\mu$ | $\sigma$ |
| $H_{1/3}^I$         | 0.50  | 0.254    | 0.50  | 0.232    |
| $T_{1/3}^I$         | 12.03 | 3.756    | 12.16 | 3.447    |
| $T_{1/3}^{II}$      | 5.44  | 1.085    | 5.43  | 0.980    |
| $\bar{\theta}^{II}$ | 2.52  | 0.699    | 2.48  | 0.630    |

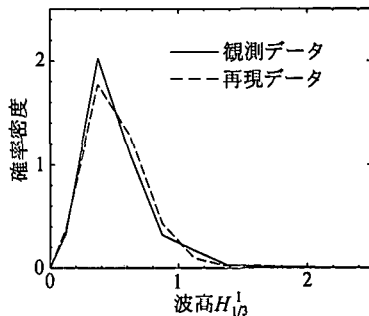


図-10 長周期成分の波高の頻度分布比較図

発生している。また、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。

(2) 単峯型および多峯型スペクトル波の波浪諸元間においては、相関関係を明らかにした。

(3) 波浪諸元間の相関を用いて、多峯型スペクトル波を含む波の出現分布を求める方法について提案した。

(4) 多峯型方向スペクトル波の波浪諸元の再現性について検討した結果、波浪諸元の観測結果と再現結果はよく一致することがわかった。

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、港内静穏度を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。

本研究は文部省科学研究費補助金基礎研究B(代表者:高山知司, 課題番号:10555173)によることを付記する。

## 参 考 文 献

- 高山知司, 橋本典明, 永井紀彦, 高橋智晴, 佐々木弘(1992): 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, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 176-180.
- 合田良實(1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 267-290.
- Soares, C. G. (1991): On the occurrence of double peaked wave spectra, Ocean Engineering 18, pp. 167-171.