

# 御坊沖における方向スペクトルの特性と 港内静穏度に与える影響

北野正夫<sup>1</sup>・殿最浩司<sup>2</sup>・真期俊行<sup>3</sup>・佐藤広章<sup>4</sup>・高山知司<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工修 関西電力(株)土木建築室マネージャー(〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)ニュージェック河川海岸部(〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

<sup>3</sup>(株)ニュージェック河川海岸部(〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

<sup>4</sup>工修 (株)ニュージェック河川海岸部(〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 京都大学防災研究所教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

本研究では、和歌山県御坊市沖における方向スペクトルの観測結果を用いて、この海域における方向スペクトルの出現特性、特に多峰型方向スペクトルの出現特性について検討を行った。その結果、特に冬季において、多峰型方向スペクトルの出現頻度が予想以上に高いことがわかった。また、港内静穏度解析の精度向上を目的として、方向スペクトルの出現特性が港内静穏度に与える影響について検討し、港外で観測した方向スペクトルそのものを用いて港内波高を推定する方法を示した。この方法を用いて港内静穏度を評価し、港内波浪の実測値と比較した結果、港内観測波浪の再現性が高く、方向スペクトルの多峰性を考慮することの重要性が確認された。

**Key Words :** *directional spectrum off Gobo, harbor tranquility, multi-peaks directional waves*

## 1. はじめに

従来、海の波は一つの代表波諸元を用いてその特性を表すことが行われてきた。代表波としては有義波や平均波向等が一般的に用いられ、その波高と周期、平均波向により、その波群の特性を表す場合が多い。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ができないため、成分波のエネルギーの分布を周波数および波向に対して表示するスペクトルが必要である。この波浪のスペクトルには、方向別のエネルギーの分布を考えずに周波数に対する分布だけを表す周波数スペクトルと、方向と周波数の両者を考えた方向スペクトルに区別して表現することが一般的である。このうち、周波数スペクトルについては、世界各地で非常に多くの波浪記録が解析され、その特性が比較的良くわかっている。一方、方向スペクトルについては、従来、観測が困難なため不十分な情報が得られていなかった。しかし、近年、方向スペクトル解析手法の研究が進むとともに、波高計アレー(永井ら<sup>1)</sup>)や海象計(高山ら<sup>2)</sup>、橋本ら<sup>3)</sup>)等による観測が普及しつつあり、沿岸域における波浪の方向スペクトルの出現特性に関する研究が行われるようになってきた。その結果、高山ら<sup>4)</sup>は、御前崎港を対象とした方向スペクトルの解析結果から、多峰型方向スペクトルの出現率は年間平均約35%であり、予想以上に多いことを示している。また、永井ら<sup>5)</sup>は、うねりと風波が異

なる方向から来襲しているような複雑な波浪場は、周期帯毎の成分波の波高と波向を用いて表記することが有効であることを示している。

さらに、高山ら<sup>4)</sup>および永井ら<sup>5)</sup>は、港内静穏度等の解析に当たっては、従来の一つの代表波の諸元で表された波浪の統計解析結果だけを用いることに問題があることを指摘している。すなわち、多峰型方向スペクトルが出現していても、従来の方法では代表波の諸元を用いた単峰型の方向スペクトルとして解析することになり、解析結果に大きな誤差を含む可能性があることを指摘している。

これまでこのような指摘がなされているにもかかわらず、多峰型方向スペクトルが出現した場合、それが港内静穏度に及ぼす影響を検討した例はほとんどない。なお、多峰型方向スペクトルが波浪変形計算に及ぼす影響を検討したものとして、永井ら<sup>6)</sup>の研究が挙げられるが、静穏度に及ぼす影響については検討されていない。そこで本研究では、和歌山県御坊市沖を対象として、海象計により観測した方向スペクトルを用いて、この海域での方向スペクトルの出現特性、特に多峰型方向スペクトルの出現特性の検討を行った。また、港内静穏度予測の精度向上を目的として、方向スペクトル、特に多峰型方向スペクトルの出現特性が港内静穏度に与える影響について検討した。また、港外で観測した方向スペクトルそのものを入力条件として港内波高を推定する方法を用いて

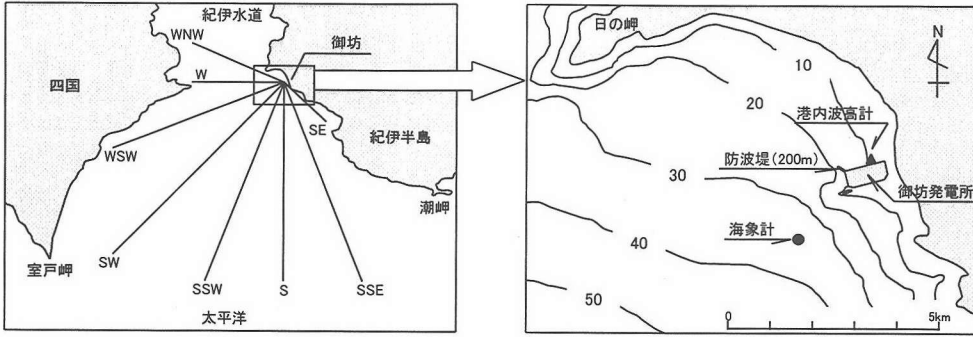


図-1 対象地点と波高計設置位置

港内静穏度を評価し、全て単峰型の方向スペクトルとして取り扱う従来法との比較を行い、方向スペクトル形状が港内静穏度に与える影響について検討を行った。

## 2. 対象地点と検討に用いた波浪観測データ

本研究で対象とした地点は、図-1に示す和歌山県御坊市沖である。本地点は、SSEからSWにかけての南方向は直接太平洋に面しているが、その他の方向は四国や紀伊半島に遮蔽されている地形を有している。

港外での波浪および方向スペクトルを観測するための海象計は、図-1の●印で示す水深約36mの位置に設置した。また、港内波高の観測は、図-1の▲印で示すように、御坊火力発電所(関西電力株)の防波堤(延長200m)の背後水深約10mの地点に超音波式波高計を設置して行った。

海象計は、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<sup>2)</sup>、橋本ら<sup>3)</sup>)。本研究では、1時間ごとに20分間の水位および流速を時間間隔 $\Delta t = 0.5s$ で観測し、Zero-up-Cross法による有義波高等の代表波の諸元を算定するとともに、橋本ら<sup>7)</sup>によって提案された拡張最大エントロピー法(EMEP法)により方向スペクトルを算出した。また、港内波高計では、港外の海象計による観測と同時刻の20分間の水位を $\Delta t = 0.5s$ で観測し、Zero-up-Cross法により有義波高等の代表波の諸元を算出するとともに、FFT解析により周波数スペクトルを算出した。

なお、本研究で対象とした期間は、1996年7月～1998年6月の2年間であり、検討に用いた方向スペクトルは約16,000個である。

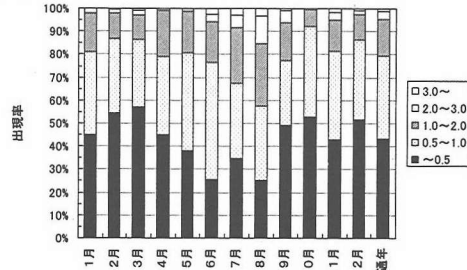


図-2 月別の有義波高の出現率

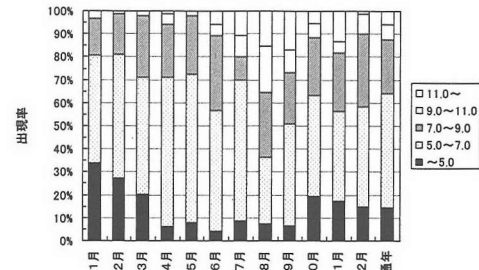


図-3 月別の有義波周期の出現率

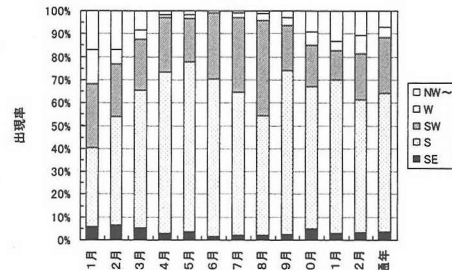


図-4 月別のピーク波向の出現率

## 3. 御坊沖の波浪と方向スペクトルの出現特性

### (1) 波高・周期・ピーク波向の出現分布

海象計(港外)の波浪観測結果として、月別の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ およびピーク波向(方向スペクトルにおけるエネルギーピーク方向)の出現率を示したものが図-2～図-4である。これらによると、 $H_{1/3}$ が2m

表-1 御坊沖の観測方向スペクトルのパターンとその特徴

パターンⅠ	ピーク波向がS系の単峰型の方向スペクトルであり、S系の風波および太平洋を伝播してくるうねり性波浪がこのパターンである。
パターンⅡ	ピーク波向がW系の単峰型の方向スペクトルであり、本地点ではW系の風波がこのパターンである。
パターンⅢ	S系の波浪とW系の波浪が混成する多峰型の方向スペクトルであり、S系風波とW系風波あるいはS系のうねりとW系の風波が混在する場合がこのパターンである。
パターンⅣ	波向は同一であるが、周期が異なる多峰型の方向スペクトルであり、うねりと風波が同一方向から来襲する場合がこのパターンである。

を越える高波浪の出現率が高くなるのは6月から9月にかけてであり、一年を通じて8月が最もその出現頻度が高い。また、 $T_{1/3}$ が9sを超えるような周期の長い波浪の出現率も同じような傾向である。これは、夏から秋にかけて発生する台風により、うねり性の波浪が来襲する頻度が高くなるためであると考えられる。

ピーク波向についてみると、夏期ではS~SW(以下S系と呼ぶ)の出現率が高いが、冬期ではW~NW(以下W系と呼ぶ)の出現率が高くなり、一年を通じてピーク波向がW系の出現率が最も大きくなっているのは1月の31%である。これは、冬期季節風による風波によるものと考えられる。

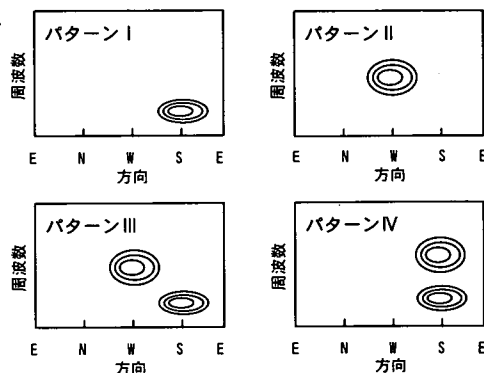
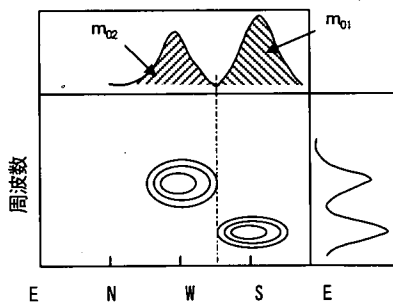


図-5 御坊沖の観測方向スペクトルのパターン

(2) 方向スペクトルの分類とその出現率

観測した方向スペクトルには様々な形状のものがあるが、観測時点の気象擾乱に応じて図-5および表-1に示すように4つのパターンに大別できる。この場合、方向スペクトルの単峰型と多峰型の判定は、図-6に示すように、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方向あるいは周波数を境にして、スペクトルの積分値を算出し、小さい方のスペクトルの積分値の平方根が、大きい方のスペクトルの積分値の平方根の0.5倍以上となる場合には多峰型とし、その他は単峰型と判定した。この方法では、3つ以上のピークを持った多峰型方向スペクトルを分類することができないが、3つ以上のピークを持った方向スペクトルは非常に少ないことと、3つ以上のピークを持っていても第3ピークのスペクトル値は第1および第2ピークに比べて非常に小さいことから、本研究では多峰型方向スペクトルは、全て2つのピークを持った双峰型としている。なお、高山ら<sup>4)</sup>は方向スペクトルの最大値の1/2より高いピークが他に存在する場合を多峰型として判定している。この場合、港内静穏度に有意な影響を与えないと考えられる方向スペクトルの微小なピークが存在した場合でも多峰型と判定されることとなる。そのため、本研究では、方向スペクトルのピーク値そのものではなく、各ピークの波高に相当する値を用いて多峰型を判定するものとした。



$$\sqrt{m_{02}} / \sqrt{m_{01}} > 0.5 \text{ の場合多峰型と分類する}$$

図-6 単峰型方向スペクトルと多峰型方向スペクトルの分類方法

対象期間の全波浪の方向スペクトルのパターン分類を行い、その出現率を調べたものが図-7である。これによると、パターンⅠ(S系単峰型)となる方向スペクトルの出現が最も多く70.2%であり、逆にパターンⅡ(W系単峰型)の出現率は低く1.9%である。一方、多峰型となる方向スペクトルについては、パターンⅢ(S系とW系の波浪が重なる多峰型)の出現率は26.8%であり、パターンⅣ(方向が同一であるが周期が異なる多峰型)の出現率は1.1%で、パターンⅢに比べてパターンⅣの出現率は非常に低い。

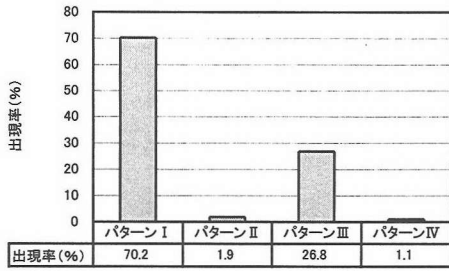


図-7 方向スペクトルの出現率  
(1996年7月~1998年6月)

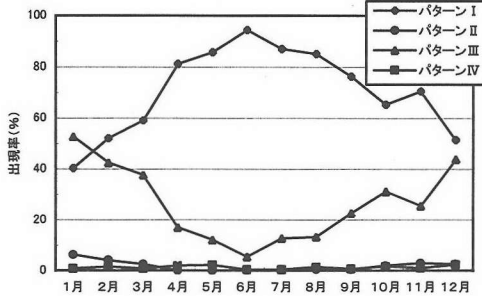


図-8 方向スペクトルのパターンの月別出現率  
(1996年7月~1998年6月)

図-8は、月別に各パターンの出現率を示したものである。これによると、夏期にはパターンⅢとなる多峰型方向スペクトルの出現率が低く、一年を通じて最もその出現率が低くなっているのは6月の5.3%である。また、逆に冬期にはパターンⅢとなる多峰型の方向スペクトルの出現率が高くなり、一年を通じて最もその出現率が高くなるのは1月の52.7%である。冬季にパターンⅢの多峰型方向スペクトルの出現率が高くなる原因としては、西高東低の気圧配置による風波の影響が顕著になるためであると考えられる。気圧配置が西高東低になると、W系およびN系の季節風が強まり風波が発生する。発生した風波は、N系の風波であっても、日の岬の回折効果により、御坊地点ではW系の波浪となる。なお、これについては、紀伊水道を対象として、SWAN<sup>8)</sup>を用いて風向Nの風が吹いた場合の波浪推算を実施し、御坊地点で波向がW系になることを確認している。したがって、S系のうねり性波浪に冬季季節風によるW系の風波が重なることにより、多峰型の方向スペクトルを持つ波浪が発生するものと考えられる。

### (3) 観測方向スペクトルの代表例

4つに分類した方向スペクトルの代表的な観測例を図-9~図-12に示す。

パターンⅠのS系単峰型には風波とうねりが含まれ、風波の代表例を図-9(1)に、うねりの代表例を図-9(2)に示す。このうねりの代表例と風波の代表例を比較す

ると、うねりの方が方向集中度・周波数集中度が高く、シャープなスペクトル形状を示している。また、パターンⅠの方向スペクトルでは、これらの図に示すように、方向スペクトルのピークを示すS方向と反対のN方向にも小さなピーク(前述した方向スペクトルの分類方法では多峰型と判定されない程度のピーク)が現れる。これは、図-1に示すように、海象計の設置されている地点の北側には日の岬(浜や岩礁部)があり、そこからの反射波の影響が現れているものと考えられる。

パターンⅡのW系単峰型の方向スペクトルの代表例を図-10に示す。W系の単峰型波浪は、冬季の季節風により発生した風波であると考えられ、図-9(2)に示したうねり性の波浪に比べ、周波数方向にやや幅の広いスペクトル形状となっている。

パターンⅢの多峰型方向スペクトルの代表例を図-11に示す。この図よりS系の周期の長いうねりと考えられる波浪とW系の周期の短い風波と考えられる波浪が重なることにより、多峰型の方向スペクトルが発生していることが分かる。

パターンⅣの多峰型方向スペクトルの代表例を図-12に示す。このようなパターンになるのは、うねり性波浪が来襲している時にS系の風波が発達した場合に生じる。

なお、パターンⅣの出現率がパターンⅢに比べて非常に低いことから、以下では特に言及しない限り、パターンⅢの方向スペクトルのことを多峰型方向スペクトルと呼ぶものとする。

### (4) 有義波高と多峰型方向スペクトルの出現率

方向スペクトルを分類した結果から、多峰型方向スペクトルの出現率を有義波高 $H_{1/3}$ との関係で示したものが図-13である。これによると、 $H_{1/3}$ が大きくなると、多峰型方向スペクトルの出現率が低下することがわかる。このような波高増大により多峰型方向スペクトルの出現率が減少することは、御前崎港を対象とした高山ら<sup>4)</sup>の検討結果や Soares<sup>9)</sup>の検討結果と同様である。

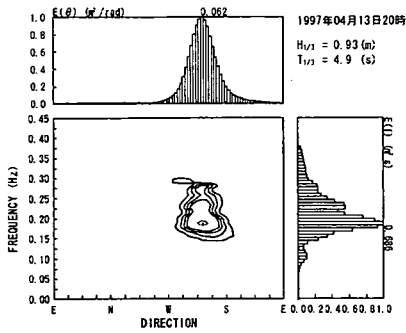
## 4. スペクトルと代表波の関係

### (1) スペクトルと有義波高の関係

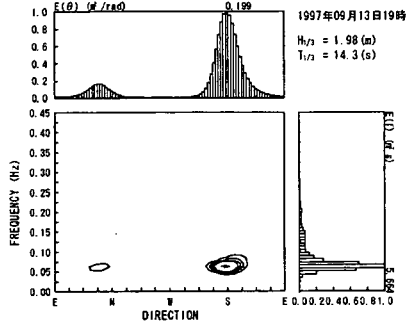
一般的に、不規則波の波高分布がレーリー分布に従う場合、方向スペクトル $s(f, \theta)$ を積分して得られる波の総エネルギー $m_0$ と有義波高 $H_{1/3}$ の間には、次式で示されるような統計的關係が成り立つ。

$$H_{1/3} = \alpha \sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) d\theta df \quad (2)$$



(1) 風波



(2) うねり性波浪

図-9 パターンI (S系単峰型)の代表例

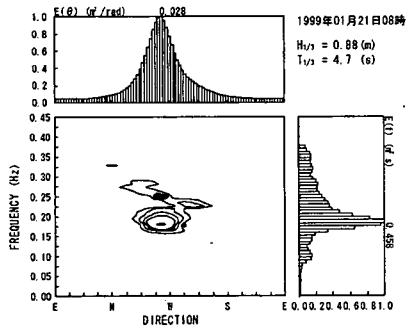


図-10 パターンII (W系単峰型)の代表例

比例係数  $\alpha$  は、波高がレーリー分布に従うときには、 $\alpha = 4.004$  の関係が成り立つ。しかしながら、実際の波浪の波高分布は、レーリー分布よりもわずかながら分布幅が狭い傾向にあり、合田<sup>10)</sup>は実波形の解析結果から、比例係数  $\alpha$  は4.0よりも3.8の方が妥当であることを示している。

このように  $\alpha$  は常に一定ではなく、波浪観測地点の地形的特性等によって変化することが予想される。したがって、港内静穏度予測において  $m_0$  から港内波高を算出する際には、あらかじめ対象地点における  $\alpha$  を求めておく必要がある。

図-14は、海象計(港外)の方向スペクトルを積分して得られた  $\sqrt{m_0}$  と Zero-up-Cross 法で算定した有義波高  $H_{1/3}$  の関係を示したものである。また、式(3)は最小二乗

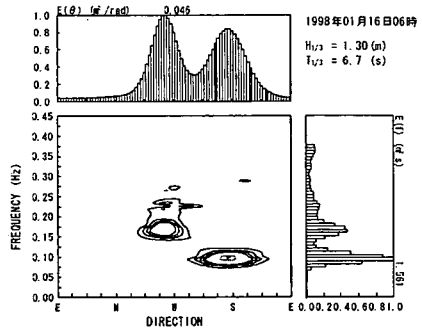


図-11 パターンIII (二方向多峰型)の代表例

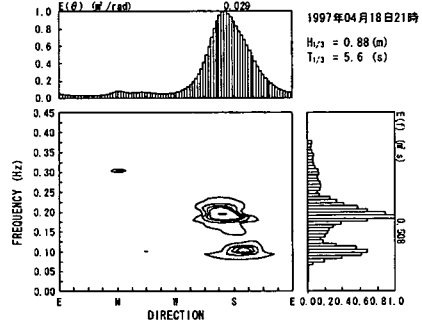


図-12 パターンIV (一方向多峰型)の代表例

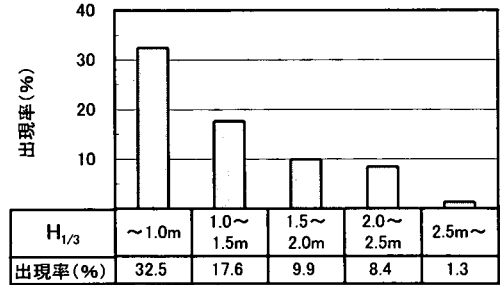


図-13 波高ランク毎の多峰型方向スペクトルの出現率

法により回帰直線を求めた結果であり、相関係数  $R$  は0.998、比例係数  $\alpha$  は3.70となる。港外では  $\sqrt{m_0}$  と  $H_{1/3}$  の関係はばらつきが少なく、比例係数  $\alpha$  も合田が示している3.8とほぼ一致する。

図-15は、港内波高計の周波数スペクトルを積分して得られた  $\sqrt{m_{0d}}$  と港内の有義波高  $H_{1/3d}$  の関係を示したものである(以下、添字  $d$  は港内波高計地点の諸量を表す)。式(4)は最小二乗法により回帰直線を求めた結果であり、相関係数  $R$  は0.992で、港内においても  $\sqrt{m_{0d}}$  と  $H_{1/3d}$  の関係はばらつきが少ないことがわかる。しかしながら、比例係数  $\alpha$  は3.38となり、海象計(港外)の結果や合田らによる検討結果よりも小さい値となった。

$$H_{1/3} = 3.70\sqrt{m_0} \quad (R = 0.998) \quad (3)$$

$$H_{1/3d} = 3.38\sqrt{m_{0d}} \quad (R = 0.992) \quad (4)$$

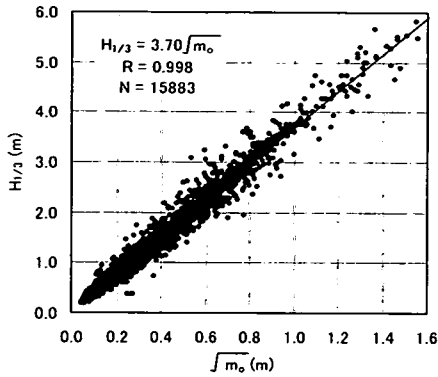


図-14  $\sqrt{m_0}$  と有義波高の関係(海象計)

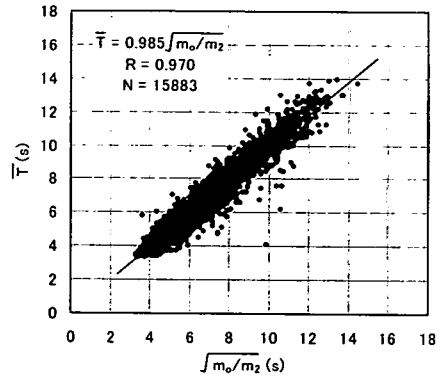


図-16  $\sqrt{m_0/m_2}$  と平均周期の関係(海象計)

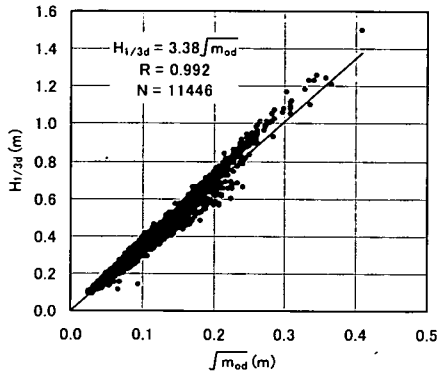


図-15  $\sqrt{m_{0d}}$  と有義波高の関係(港内波高計)

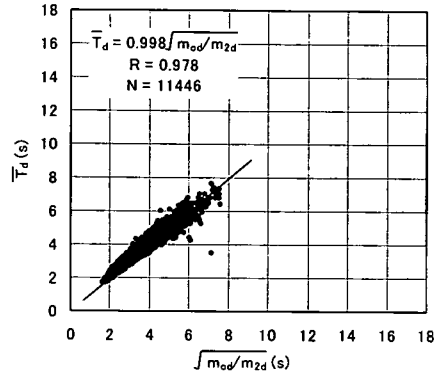


図-17  $\sqrt{m_{0d}/m_{2d}}$  と平均周期の関係(港内波高計)

この理由として、港内波高計地点では、岸壁から近いことにより反射波の影響が現れるなど、複雑な波浪場となっていることが考えられる。そのため位相のずれが生じ、波高分布がレーリー分布から外れていることが考えられ、それが一因となって $\alpha$ の値が小さくなったものと考えられる。

なお、図示はしていないが、港外波浪および港内波浪を方向スペクトル形状(単峰型・多峰型)により分類し、 $\sqrt{m_0}$ と $H_{1/3}$ との関係を検討した。その結果、スペクトル形状の違いによる比例係数 $\alpha$ の値の有意な差は現れなかった。

## (2) スペクトルと平均周期の関係

不規則波の統計理論によると、Zero-up-Cross法で定義した波の平均周期 $\bar{T}$ は、周波数スペクトルの2次モーメント $m_2$ を使って次式で計算できる<sup>11)</sup>。

$$\bar{T} = \sqrt{m_0/m_2} \quad (5)$$

$$m_2 = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi f^2 S(f, \theta) H \theta df \quad (6)$$

図-16は、海象計(港外)の方向スペクトルから算定した $\sqrt{m_0/m_2}$ とZero-up-Cross法で算定した平均周期 $\bar{T}$ の

関係を示したものである。これによると、両者は1:1のライン上に分布しており、相関係数 $R$ は0.970でばらつきが少なく、式(5)の適用性が確認できる。

図-17は、港内波高計の周波数スペクトルから算定した $\sqrt{m_{0d}/m_{2d}}$ とZero-up-Cross法で算定した平均周期 $\bar{T}_d$ の関係を示したものである。港内波高計においても、両者は1:1のライン上に分布しており、相関係数 $R$ は0.978でばらつきが少なく、式(5)の適用性が確認できる。

## 5. 観測方向スペクトルを用いた港内静穏度の評価法

### (1) 従来の港内静穏度の評価法とその問題点

従来、港内静穏度を評価する場合、港内波高の出現率の算定は、港外の波向別波高出現率表を実測値または推算値に基づき作成し、それに対して回折や反射等の港内波浪の波浪変形に留意して港内波高の出現率を算定する手法がよく用いられている。この港内波浪の変形計算には、高山<sup>12)</sup>が提案した手法に代表されるように、方向スペクトルを有する不規則波を考慮することが一般的である。また、その場合、港外での方向スペクトルを仮定す

る必要があり、実務的には観測もしくは推算した有義波高  $H_{1/3}$  や有義波周期  $T_{1/3}$  の代表波の諸元を用いて、光易型方向関数<sup>13)</sup>の方向集中度パラメータ  $S_{max}$  を推定する方法がよく用いられている。

しかしながら、3. で示したように風波とうねりが異なる方向から来襲する場合は多峰型方向スペクトルの波浪場となり、光易型方向関数のような理想的な方向スペクトル形状となっていないことが考えられる。このような場合、従来の方法では、港内波高の推定精度が十分でないことが予想される。例えば、本地点では、図-11に示したような多峰型の方向スペクトルが出現していても、従来の方法ではピーク波向あるいは平均波向をピークとする単峰型の方向スペクトルを仮定することになり、多峰型の第2ピークが現れるW系の波浪エネルギーを表現できないことになる。

## (2) 観測方向スペクトルの港内静穏度評価への適用

これらの問題点を解消する手法の一つとして、現地を観測した港外での方向スペクトルを用いて港内静穏度を評価する手法を検討した。従来の手法は、港外の代表波の諸元から方向スペクトルを間接的に求める方法(以下間接法と呼ぶ)であるのに対し、ここで示す手法は観測した港外での方向スペクトルを直接用いることから、以下では直接法と呼ぶものとする。

直接法による港内波高の具体的な算定法は、あらかじめ各成分波の港内波高計地点の波浪変形係数  $K_T(f, \theta)$  を算定しておき、海象計(港外)で観測した方向スペクトルの各成分  $S(f, \theta)$  に  $K_T^2(f, \theta)$  を乗じて港内波浪のスペクトルの積分値  $m_{0d}$  を求め、港内での有義波高  $H_{1/3d}$  および平均周期  $T_d$  を次式で算定するものである。

$$H_{1/3d} = \alpha \sqrt{m_{0d}} \quad (7)$$

$$T_d = \beta \sqrt{m_{0d} / m_{2d}} \quad (8)$$

$$m_{0d} = \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi S(f, \theta) K_T^2(f, \theta) d\theta df \quad (9)$$

$$m_{2d} = \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi f^2 S(f, \theta) K_T^2(f, \theta) d\theta df \quad (10)$$

本研究では、港内における式(7)の比例係数  $\alpha$  および式(8)の比例係数  $\beta$  については、4. の検討結果から  $\alpha=3.37$ ,  $\beta=1.00$  に設定した。ただし、ここで設定した  $\alpha$  および  $\beta$  は、本地点のみの検討結果であるため、他地点においてそのまま使える係数ではないことに留意する必要がある。

一般に、港内静穏度を評価する場合、港口部の波浪に対して回折係数  $K_r$  を乗じる方法がよく用いられている。しかしながら、本地点の場合、図-1に示すように海象計の位置と港口部がかなり離れていることから、その間での屈折・回折・反射等の影響を考慮する必要があると

表-2 成分波の波浪変形係数算定条件

波向 $\theta$	$\Delta\theta=22.5^\circ$ (NW, WNW, W, WSW, SW, SSW, S, SSE)	8 ケース
周期 $T$	$\Delta T=2.0s$ (4.0s~20.0s) 30.0s, 50.0s, 100.0s	12 ケース

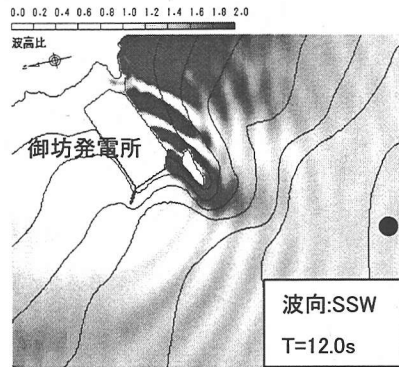


図-18 波高比分布計算結果の一例

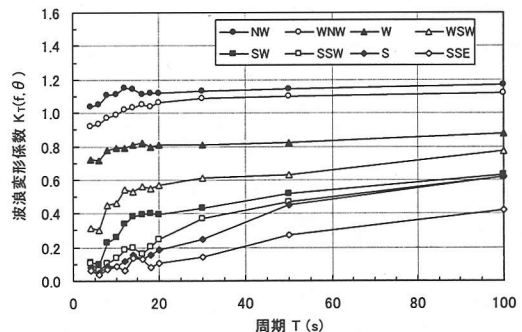
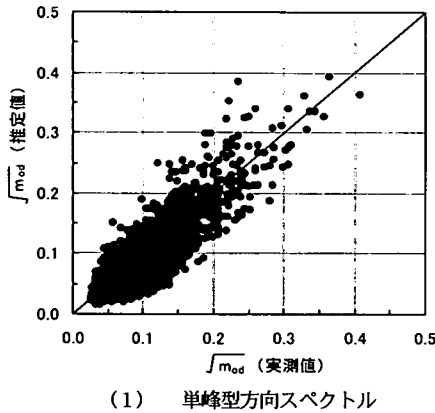


図-19 成分波の波浪変形係数算定結果

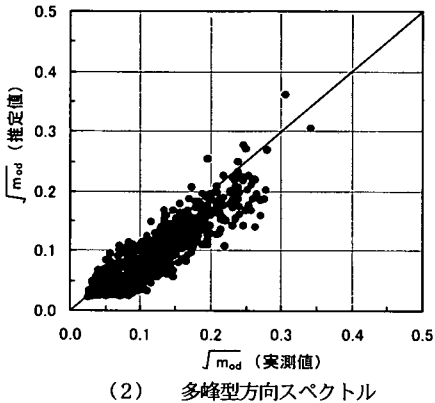
判断し、非定常緩勾配方程式<sup>14)</sup>による計算を実施し、波浪変形係数  $K_T(f, \theta)$  を海象計(港外)と港内波高計の波高比で与えることとした。

非定常緩勾配方程式による波浪変形計算(成分波の波浪変形係数の算定)は、波向別および周期別に表-2に示す合計96成分の計算を実施した。図-18は、この計算結果の一例(波向:SSW, 周期  $T=12.0s$ )である。

図-19は、全96ケースの波浪変形係数  $K_T(f, \theta)$  を入射波の波向別に整理したものである。これによると、 $K_T$  は、周期よりも波向の影響を強く受けていることがわかる。波向がS系では  $K_T$  は0.2程度の小さい値を示すが、波向がW系に移るにしたがって  $K_T$  は増加し、波向WNW~NWでは  $K_T$  が1.0を越える場合もある。これは、W系の波は港内に直接入射し回折による波高減衰が少ないこと、および港内での岸壁からの反射波の影響が現れたものと考えられる。なお、EMEP法による方向スペクトルの解析は、周波数分割数49, 方向分割数88(合計4312成分)とした

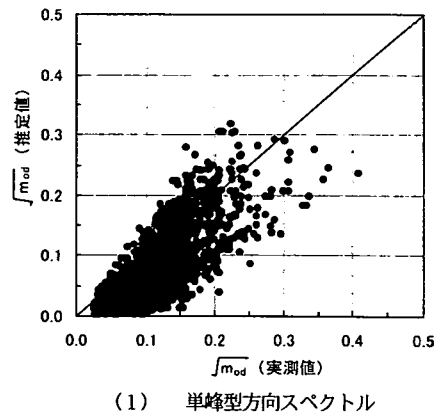


(1) 単峰型方向スペクトル

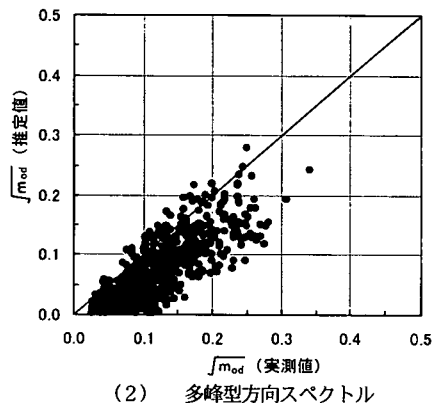


(2) 多峰型方向スペクトル

図-20  $m_{od}$  の実測値と推定値の比較(直接法)



(1) 単峰型方向スペクトル



(2) 多峰型方向スペクトル

図-21  $m_{od}$  の実測値と推定値の比較(間接法)

ため、表-2の計算点と異なる成分波の $K_r(f, \theta)$ は全て線形補間を行って算定した。

一方、比較のために実施する間接法では、海象計(港外)で実測した $H_{V3}$ と $T_{V3}$ から光易型方向関数の方向集中度パラメータ $s_{max}$ を設定して、標準的な方向スペクトルを仮定した。また、 $s_{max}$ の設定は、実務的によく用いられている方法として、実測した有義波諸元( $H_{V3}$ ,  $T_{V3}$ )から波形勾配 $H_0/L_0$ を算定し、 $H_0/L_0 \geq 0.03$ の場合には $s_{max} = 10$ 、 $0.015 \leq H_0/L_0 < 0.03$ の場合には $s_{max} = 25$ 、 $H_0/L_0 < 0.015$ の場合には $s_{max} = 75$ とした。また、方向スペクトルのピーク波向は、実測最大波向を16方位分割したときの方角とした。

## 6. 方向スペクトルの多峰性が港内静穏度と与える影響

### (1) 港内波高の算定結果と実測値の比較

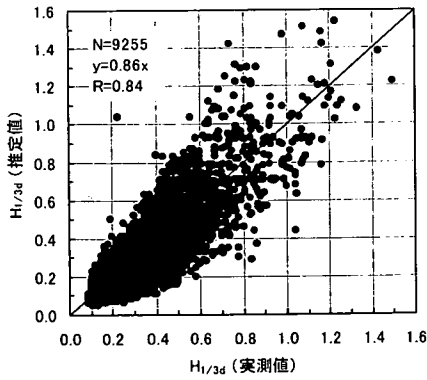
図-20および図-21は、直接法と間接法を用いて推定した港内での方向スペクトルの積分値 $m_{od}$ と実測値(港内波高計で実測した周波数スペクトルを積分したもの)の

比較を単峰型と多峰型(海象計で実測した方向スペクトルから分類)に分けて示したものである。また、図-22および図-23は、直接法と間接法を用いて式(7)によって算定した港内の有義波高と港内波高計で実測した有義波高の比較を同じく単峰型と多峰型に分けて示したものである。

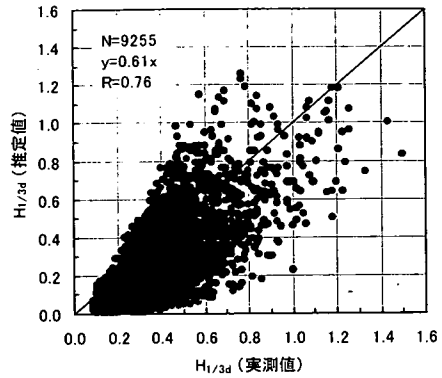
図-20と図-22から、波高に換算する前のスペクトルの積分値 $m_{od}$ と換算後の有義波高 $H_{V3d}$ を比較すると、港外の方向スペクトルが単峰型・多峰型に関係なく、 $m_{od}$ のほうがばらつきが小さくなっている。これは、式(7)により $m_{od}$ から $H_{V3d}$ に換算する場合の比例係数 $\alpha$ のばらつきが影響しているものと考えられる。

図-22と図-23の比較から、直接法と間接法の港内波高 $H_{V3d}$ の推定精度について検討すると、図-22の直接法では、港外の方向スペクトルが単峰型・多峰型に関係なく、推定値と実測値がほぼ1:1のライン上でばらついており、両者は比較的良く一致しているものと考えられる。これに対し、図-23の間接法では、港外の方向スペクトルが単峰型・多峰型に関係なく推定値のほうが実測値よりも波高が小さくなる傾向にある。この原因として、間接法では、海象計(港外)において主波向がS系でW系が

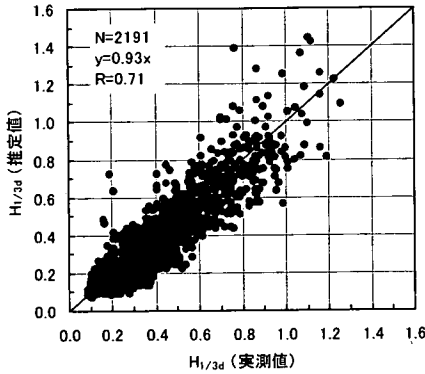




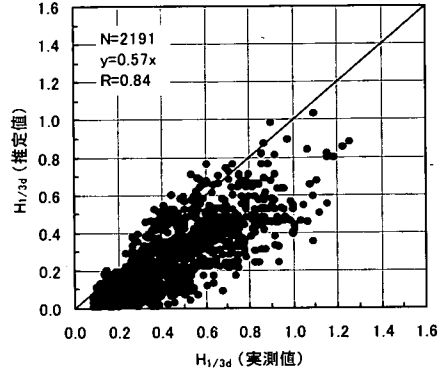
(1) 単峰型方向スペクトル



(1) 単峰型方向スペクトル



(2) 多峰型方向スペクトル



(2) 多峰型方向スペクトル

図-22 有義波高の実測値と推定値の比較(直接法)

図-23 有義波高の実測値と推定値の比較(間接法)

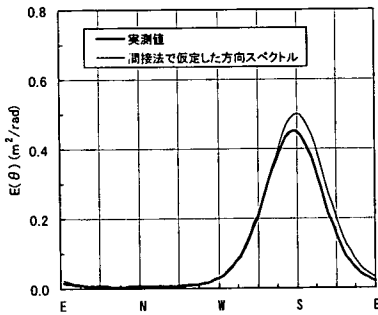
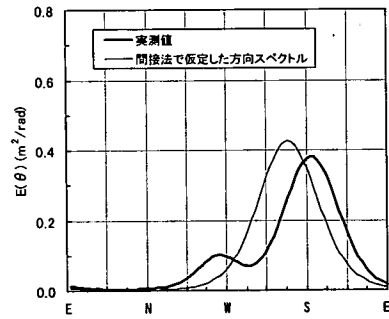
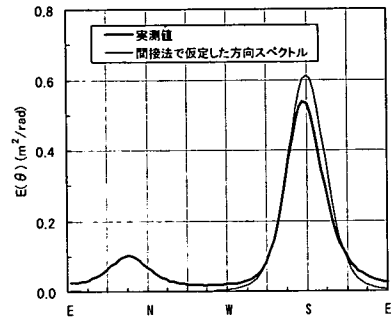


図-24 間接法で仮定した方向スペクトルと実測値の比較 (両者がほぼ一致している場合)



(1) W方向に若干のエネルギーが存在する場合



(2) N方向からの反射波の影響が現れている場合

図-25 間接法で仮定した方向スペクトルと実測値の比較 (両者があまり一致しない場合)

第2ピークとなるような方向スペクトルを有していても、これをS系の単峰型として設定してしまうために、W系のエネルギーを考慮できなくなるのが挙げられる。

一方、単峰型の場合、図-24に示すように間接法で仮定した方向スペクトルと実測の方向スペクトルがほぼ一致している場合には、推定値は実測値を精度良く再現する。しかし、単峰型でも、図-25に示すように、仮定した方向スペクトルと実測の方向スペクトルがあまり一致しない場合(小さな第2ピークが現れるような場合)には、単峰型でも  $H_{1/3d}$  の推定値と実測値は一致しない。

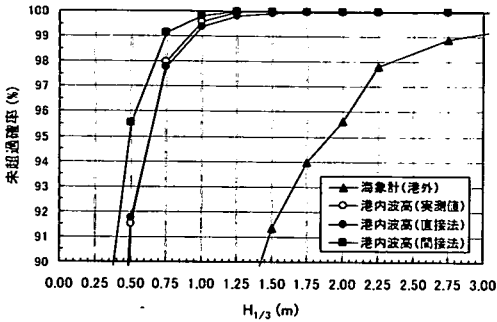


図-26 港内波浪の未超過確率分布の比較

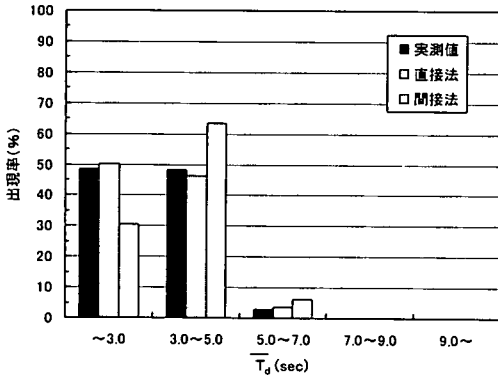


図-27 港内波浪の平均周期の出現分布の比較

## (2) 港内波高の出現分布の比較

図-26は、前述した2年間に1時間ピッチで実測された方向スペクトルを基に、直接法および間接法を用いて港内波高を算定した場合の有義波高 $H_{1/3d}$ の未超過確率分布を実測値の未超過確率分布と比較して示したものである。

これによると、直接法は実測の港内波高をよく再現していることがわかる。一方、間接法では実測の港内波高分布よりも小さい波高の出現率が大きくなり、港内静穏度を過大評価していることになる。例えば、港内の荷役限界波高を $H_{1/3d} = 0.5\text{m}$ とすると、実測値では91.5%の静穏度であるのに対し、直接法では港内静穏度は91.8%となり、ほぼ実測値と一致するが、間接法では95.5%となり、港内静穏度を約4%過大評価している。現行の「港湾施設の技術の基準・同解説」<sup>15)</sup>では、泊地の静穏度は荷役限界波高以下の波高の出現率が年間を通じて97.5%を確保するものとなっており、実務的には、この97.5%前後数%の差で静穏度を満足したり、満足しなかったりするケースが多いため、この差4%は港湾計画を左右する決定的な意味をもつ数字であると考えられる。

## (3) 港内の平均周期の出現分布

図-27は、直接法と間接法を用いて算定した港内の平

均周期 $\bar{T}_d$ の出現分布を実測値の出現分布と比較して示したものである。これによると、港内波浪の周期についても直接法の方が間接法に比べてよく実測値を再現していることがわかる。

## (4) 港内の周波数スペクトルの比較

従来、港内の静穏度については港内の波高をもって評価することが基本的な考え方であったが、最近では係留中の船舶の動揺量で評価する方法も提案されている<sup>16)</sup>。この船舶の動揺量を算定する場合には、港内の波高や周期の他に港内の周波数スペクトル形状も重要になってくるものと考えられる。港内での方向スペクトルが推定できれば、それを周波数方向に積分することによって港内の周波数スペクトルを推定することが可能である。その場合、間接法では方向スペクトルを標準的な単峰型として扱うため、港内での周波数スペクトルを精度良く算定することは困難であるが、直接法では海象計(港外)で実測された方向スペクトルから直接港内の方向スペクトルを推定するため、港内での周波数スペクトルを比較的精度よく推定することができるものと考えられる。

図-28~図-30は、直接法および間接法で推定した港内での周波数スペクトルと港内波高計で実測した水位の時系列データからFFT解析により算定した周波数スペクトルを比較したものの代表例を示したものである。

図-28は、海象計で観測した方向スペクトルの形状がパターンI(S系単峰型)の場合の代表例である。これによると、直接法の算定結果は低周波数側(長周期側)はあまり良く一致しないが、その他の周波数帯では良く一致している。一方、間接法では低周波数側の不一致は直接法と同じであるが、その他の周波数帯でも再現性は悪く、特に0.2Hz付近の小さなピーク等も表現されていない。このように、単峰型に分類されるものであっても、周波数スペクトルには小さなピークが含まれているものも多く、これを考慮することが重要である。

図-29は、海象計で観測した方向スペクトルの形状がパターンII(W系単峰型)の場合の代表例である。この場合も、低周波数側の実測値とのずれはパターンIと同様であるが、それ以外の周波数帯では両方法とも良く実測値と一致している。これは、周波数スペクトルが標準的な単峰型であるために、直接法と間接法の差が現れなかったものと考えられる。

図-30は、海象計で観測した方向スペクトルの形状がパターンIII(S系とW系にピークをもつ多峰型)の場合である。この場合の多くが港内の実測の周波数スペクトルも多峰型となり、直接法ではこの港内の周波数スペクトルを比較的良く再現できるのに対し、間接法では全く異なる形状の方向スペクトルとなり、多峰性を考慮するこ

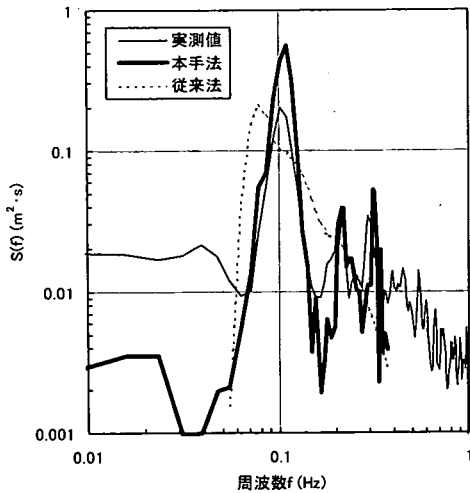


図-28 周波数スペクトルの比較(パターンⅠ)

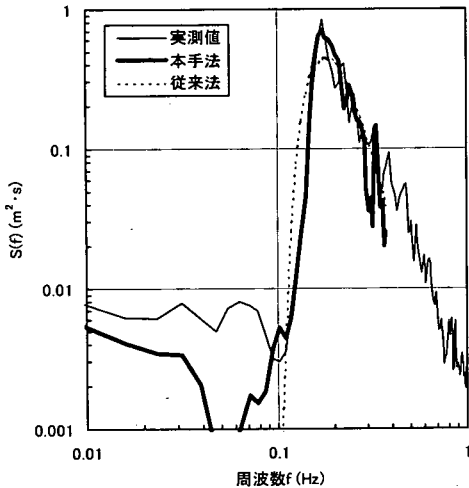


図-29 周波数スペクトルの比較(パターンⅡ)

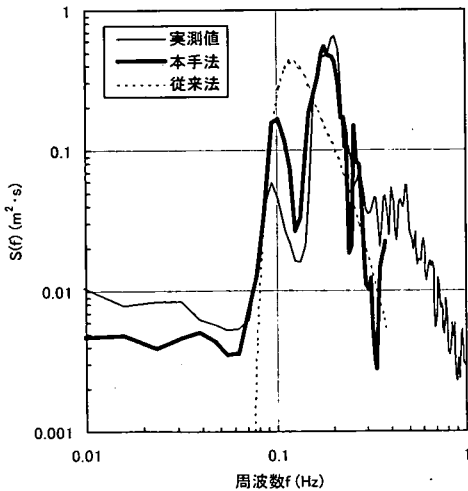


図-30 周波数スペクトルの比較(パターンⅢ)

との重要性が最も顕著に現れるケースである。

以上のことを総合的に検討すると、標準的な単峰型方向スペクトルの場合には、周波数スペクトル形状の概略形状は両方法ともほぼ再現されるが、多峰型の場合や単峰型であっても微少なピークをもつ場合には、間接法では再現性が低い。このことは、間接法は多峰型方向スペクトルの一方のピークが港内静穏度にとって不利な波浪エネルギーであっても評価されないことを表している。一方、方向スペクトルの多峰性を考慮することのできる直接法では、港内波浪の周波数スペクトルを比較的精度よく再現する。したがって、港内波浪算定にあたっては、多峰性を考慮することが重要であるといえる。

また、長周期(低周波数)側が両方法とも全体的に再現性が良好でなく、実測値のエネルギーレベルよりかなり小さく評価されている。間接法では標準スペクトルを用いるため、理論上長周期側のエネルギーはほとんどない。一方、直接法では港外で実測された方向スペクトルを直接適用するため、長周期側も再現できるはずであるが、ここで示したように直接法でもそれがあまり再現できていない。長周期波成分については、港内の共振により増幅される場合や、拘束長周期波が防波堤により拘束を解かれ、港内において長周期波が発生する場合がある。本研究で用いた手法は、これらの影響を考慮したものではないため、長周期波成分が再現できなかった可能性が考えられる。したがって、今後は、長周期波成分の推定精度向上が課題となる。

## 7. おわりに

本研究では、和歌山県御坊市沖に設置した海象計の観測結果から、この海域での方向スペクトルの出現特性、特に多峰型方向スペクトルの出現特性を検討するとともに、方向スペクトルの出現特性が港内静穏度を与える影響について検討を行った。その結果を要約すると以下のようである。

- (1) 御坊沖の多峰型方向スペクトルの出現率は年平均約27%であるが、本地点においてはその出現率の季節的な変動が大きく、冬期に出現率が高く、夏期には低くなる。このことから、本地点において多峰型方向スペクトルを誘発する気象擾乱としては、冬期の季節風が最も原因しているものと考えられる。
- (2) 多峰型方向スペクトルの出現率は、有義波高が大きくなれば低下する。
- (3) 港内静穏度の評価について、本研究で示した直接法と従来から用いられてきた間接法を比較検討した結果、直接法のほうが実測の港内波浪の出現分布によ

く一致し、間接法では港内静穏度を過大評価することがわかった。

- (4) これは、海象計(港外)で観測した方向スペクトルには、多峰型の方向スペクトルがかなりの頻度で発生していることと、単峰型の方向スペクトルでも間接法で仮定するような理想的な単峰型になっていない場合が多いことが原因している。
- (5) 港内の周波数スペクトルも、港外の方向スペクトル形状に関係なく直接法のほうが間接法に比べ実測値を良く再現した。

上記のように、方向スペクトル観測値そのものを入力条件とする直接法では、港内静穏度を精度良く評価することができ、港内静穏度評価において、方向スペクトルの多峰性を考慮することの重要性が確認された。また、方向スペクトル観測値そのものを用いて港内静穏度評価を実施することは、方向スペクトル観測値の有効利用という観点からも有用であると考えられる。なお、方向スペクトルの解析結果を残しておくことも、現在では特に大きな問題がない。実際に、1時間ピッチの方向スペクトルを解析した結果を1年間分残すのに必要な容量は約450MBであり、640MBのMOディスク一枚分の容量である。

しかしながら、方向スペクトルの観測結果が近くにない地点においては、この直接法を用いることができない。したがって、今後は気象特性等から方向スペクトルを推定する手法の検討、あるいは各地の一般的な方向スペクトルの出現分布を調べ、それらを一般化していく必要があるものと考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、京都大学大学院工学研究科 高橋英紀氏に多大なご協力を賜りました。ここに記して謝辞と致します。

## 参考文献

- 1) 永井紀彦, 橋本典明, 浅井 正: 島による遮蔽を受ける海洋波の方向スペクトルの出現特性—新潟沖の観測結果—, 港湾技術研究所資料, No. 783, p. 21, 1994.
- 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, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 176-180, 1992.
- 3) 橋本典明, 永井紀彦, 高山知司, 高橋智晴, 三井正雄, 磯部憲雄, 鈴木敏夫: 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1081-1085, 1995.
- 4) 高山知司, 高橋英紀, 永井紀彦: 御前崎沖における多峰型方向スペクトル波の出現特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 76-80, 2000.
- 5) 永井紀彦, 橋本典明, 川口浩二, 横井博志, 久高将信: 現地観測方向スペクトルに基づく波向き出現特性とその表記, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1336-1340, 2000.
- 6) 永井紀彦, 橋本典明, 浅井正, 八木橋貢, 鶴岡亮行, 清水琢三: 高波浪時の大水深域から浅海域への波浪変形の実測値に基づく検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 126-130, 1992.
- 7) 橋本典明, 永井紀彦, 浅井 正, 菅原一昇, 久高将信, 小野修平: 方向スペクトルの推定における最大エントロピー源理法(MEP)の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140, 1993.
- 8) Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C.: The SWAN wave model for shallow water, *Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Orlando*, pp. 668-676, 1996.
- 9) Soares, C.G.: On the occurrence of double peaked wave spectra, *Ocean Engineering*, Vol.18, pp.167-171, 1991.
- 10) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 28, 1990.
- 11) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 29, 1990.
- 12) 高山知司: 波の回折と港内波高分に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 367, p. 140, 1981.
- 13) Mituyasu, H.: Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *Jour. Physical Oceanography*, Vol.5, pp. 750-760, 1975.
- 14) 渡辺 晃, 丸山康樹: 屈折・回折砕波変形を含む波浪場の数値解析法, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 103-107, 1984.
- 15) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, p. 585, 1999.
- 16) 土田 充, 大山 巧, 平石哲也, 富田孝史: 港内係留船舶の長周期動揺に基づく静穏度評価法について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 321-325, 1998.

(2002. 4. 18 受付)

## STATISTICAL PROPERTIES OF DIRECTIONAL WAVES OBSERVED OFF GOBO AND THEIR EFFECTS ON HARBOR TRANQUILITY

Masao KITANO, Koji TONOMO, Toshiyuki MAKI, Hiroaki SATO  
and Tomotsuka TAKAYAMA

The directional spectra have been statistically analyzed for the waves observed off Gobo. The statistical analysis shows that the multi-peaked directional spectra occupy the relatively large percentage, especially in winter. The waves inside a harbor near from the observation station were also measured simultaneously. The reproduction procedures of the waves inside the harbor were proposed in order to evaluate the effects of multi-peaked directional spectra. The comparison of statistical properties between observed and predicted waves has concluded that the reproducibility of the procedures is fairly well and correct shapes of directional spectra outside should be employed for the estimation of harbor waves.