

実海域における波の方向スペクトルについて — 第1報 計測法の検討 —

吉元 博文*

At-Sea Measurements of Directional Wave Spectra — 1st Report Study of the Measuring Technique —

By

Hirofumi YOSHIMOTO

Abstract

At-sea experiment using prot-type floating platform "POSEIDON" is now going on at Japan Sea. This paper describes the measuring technique and the estimating method of the directional wave spectra at sea.

For the estimation of the directional wave spectra, various kinds of measuring devices and data analyzing methods have been proposed.

In this experiment, the three wave probes arranged in a line array are used and the directional wave spectra are estimated by the maximum likelihood method (MLM). Then, the accuracy of MLM was examined by tank tests and numerical simulations. In this tank test, relative wave heights of floating structure models were also measured to estimate the directional wave spectra.

The main results are as follows ;

- 1) MLM has the high resolution and can detect progressive waves using only three wave probes arranged in a line array.
- 2) The directional wave spectra can be also estimated from the relative wave heights of floating structure model.

目次

1. 緒言

2. 方向スペクトルの計測方法と解析方法

2.1 波の方向スペクトルの計測方法

2.2 波の方向スペクトルの解析方法

2.3 最尤法と拡張最尤法

3. 最尤法に対する検討

3.1 数値シミュレーション

3.2 水槽実験

3.2.1 実験の概要

3.2.2 データ解析

3.2.3 絶対水位による方向スペクトルの推定結果

(1) 一方向不規則波

(2) 二方向不規則波

(3) 多方向不規則波

(4) 考察

* 海洋開発工学部

原稿受付：平成元年6月7日

- 3.2.4 相対水位による方向スペクトルの推定結果
 - (1)一方向不規則波
 - (2)二方向不規則波
 - (3)考察
- 4. 実海域実験データの解析
 - 4.1 波高計の配置とデータ収録
 - 4.2 データ解析
 - 4.3 方向スペクトルの推定結果
 - 4.4 冬期波浪の波向きの分布
- 5. 結言
- 参考文献

1. 緒言

運輸省では、運輸技術研究開発による「海洋構造物の沖合展開のための開発研究」を、昭和61年度から実施している。その一環として、船舶技術研究所では、「浮遊式海洋構造物の開発研究」を担当し、昭和61年度より、山形県鶴岡市由良沖約3kmの海域で、大型浮遊式海洋構造物のプロトタイプ「POSEIDON」号を用いた実海域実験を実施している。この実海域実験では、実際の海域の自然環境条件を把握することも重要事項の一つとしており、その中に波の方向スペクトルの計測も含まれている。本論文では、この実海域実験で計測された波の方向スペクトルについて報告するが、ここでは、まず第一報として波の方向スペクトルの計測法と解析法について述べる。

実際の海域で、海洋構造物あるいは船舶が遭遇する海洋波は不規則に変化しており、この海洋波の特性をとらえるために、周波数スペクトルの概念が一般的に用いられている。しかし、実際の波は、周波数成分だけでなく無数の波向き成分も含んでおり、この波向きに対する波のエネルギーの分布状態を表わすものが、方向スペクトルである。海上の特定の海域に係留され、方向を自由に变化させることのできない海洋構造物では、構造物の運動や構造強度等を検討する際に、この方向スペクトルの概念の導入が望ましいが、方向スペクトルを計測するには、多大な労力と費用が必要であるために、これまでに蓄積されたデータが非常に少ないのが実情である。

現在、一般的に用いられている方向スペクトルの計測方法は、定点計測法とリモートセンシング法に大別することができる。本実海域実験では、3台の超音波式波高計を用いた波高計群（アレイ）方式による定点計

測法を用いている。アレイ方式を用いた場合、限られた波高計の同時記録から、いかに精度よく方向スペクトルを推定するかが重要な課題となる。

方向スペクトルの推定方法としては、これまでに、いくつかの方法が提案されているが、今回の実海域実験では、比較的少ないアレイでも高い分解能をもつ最尤法を用いて、方向スペクトルの推定を行なった。今回の解析にあたり、数値シミュレーションや水槽実験などを行ない、最尤法の推定精度に対して検討を行なった。これと同時に、水槽実験では、方向スペクトルの簡易な計測法を開発することを目的として、「POSEIDON」号の14分の1模型を用いて、係留された海洋構造物模型の相対水位から方向スペクトルを推定する方法についても検討した。

さらに、実海域で計測されたデータの代表例として、昭和62年11月19日23時、昭和63年2月3日17時の定時計測で収録したデータについて、実際に最尤法を用いて解析を行なってみた。以下に、これらの結果について報告する。

2. 方向スペクトルの計測方法と解析方法

2.1 波の方向スペクトルの計測方法

波の方向スペクトルの計測には、これまでに、いくつかの方法が試みられている。すなわち、

- ①数台の波高計アレイによる方法、
- ②ブイ式波浪計による方法、
- ③波高計と2方向流速計の併用による方法
- ④リモートセンシング法（ステレオカメラやレーダーによる方法）

などがある。この中で、①は一定地点で定常的に計測することができ、また、方向スペクトルを推定するための理論的基礎が明確であるために、早くからいろいろ検討がなされてきた。そして、波高計の配置方法などについての一般的な指針が、合田¹⁾によってまとめられており、沿岸波浪のように波の来襲方向が、沖側ほぼ $\pm 90^\circ$ と想定できる場合には、波高計を直線状に配置することを推奨している。この直線アレイの特長は、波が直角方向から入射するときに非常に鋭い方向分解能をしめすことであるが、直線アレイの左右側から入射してくる波を判別できないこと、波が入射してくる方向がアレイに平行に近くなるにつれて方向分解能が低下するなどの欠点がある。

浮遊式海洋構造物「POSEIDON」号を用いた実海域

実験が実施されている山形県鶴岡市由良沖の日本海では、冬期には西北西の季節風が非常に卓越しており、波の来襲する方向は西北西を中心にして沖側ほぼ $\pm 45^\circ$ と想定することができる。従って、本実海域実験では方向分解能の高さを活かして3台の波高計による直線アレイ配置を用いることにした。また、波高計の間隔についても、合田は波高計間の最小距離を測定対象の最小波長の $1/2$ 以下となるように配置することを推奨している。従って、本実海域実験では測定対象の最小波長を60mとし、図-2.1.1に示すような配置で波高計を設置することにした。

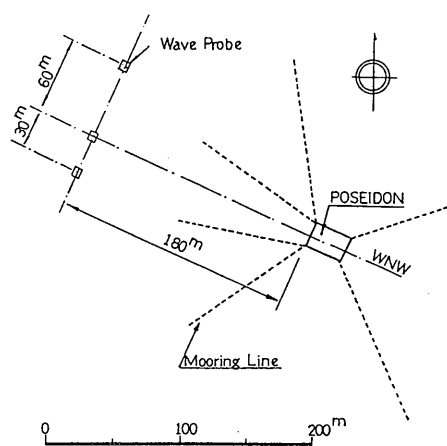


図-2.1.1 波高計の設置予定

2.2 波の方向スペクトルの解析方法

波の方向スペクトルは、波のエネルギーの波向きに関する分布を示すものである。波の周波数スペクトルは1台の波高計の水面波形の記録から求めることができるが、波の方向スペクトルを求めるためには、原理的には、無数の波高計の同時計測記録が必要となる。しかし、現実には、計測機器の購入や設置などに膨大な費用を要し、ある限られた点でしか計測を行なうことができない。従って、限られた波動量の同時計測記録から方向スペクトルを、いかに精度よく推定するかということが問題となってくる。

この問題に対しては、これまで、Barber²⁾を始めとして多くの研究者が取り組んできており、方向スペクトルを推定する方法としてはさまざまな方法が提案されている。それらを列挙すれば次のようなものがある。

①直接フーリエ変換法²⁾

②パラメータ法³⁾

③分布関数あてはめ法⁴⁾

④最尤法⁵⁾

⑤拡張最尤法⁶⁾

⑥最大エントロピー原理法⁷⁾

⑦ベイズ型モデルによる推定方法⁸⁾

①～④は、方向スペクトルの推定方法として、標準的な手法としてよく用いられているものである。最尤法は、波高計アレイを用いた場合を対象としており、この①～④の解析法の中で、最も方向分解能が優れている。さらに、最尤法は、水面波形のみに限らず、水粒子速度、水面傾斜など、任意波動量の組み合わせからなる同時計測記録からでも、高い精度で方向スペクトルが推定できるように改良された。これが⑤の拡張最尤法であり、磯部ら⁹⁾によって開発されたものである。この拡張最尤法を用いれば、一地点での水面変動、水粒子速度などの同時計測記録からでも方向スペクトルを推定できるようになる。

⑥の最大エントロピー原理法は、橋本ら⁷⁾によって開発されたものであり、一地点で3種類の波動量を観察できる場合、例えば計測機器として波高計と流速計の組み合わせ、あるいはブイに搭載された加速度計と傾斜計の組み合わせを用いた場合に対して適用することができる。一地点での3種類の波動量から方向スペクトルを推定する場合には、最大エントロピー原理法は拡張最尤法より方向分解能が優れていることが、橋本ら⁷⁾により数値シミュレーションで確認されている。

⑦のベイズ型モデルによる推定方法も橋本ら⁸⁾によって開発された手法であり、赤池が統計学の回帰分析に導入した方法を方向スペクトルの推定に応用したものであり、任意の波動量の組み合わせに適用可能である。このベイズ型モデルによる推定方法は、クロススペクトルの推定誤差の影響を受けにくく、4成分以上の波動量が計測できる時に、従来のどの推定法よりも分解能が高く安定した方法である。

このように、方向スペクトルの推定方法は、その計測方法によって様々な方法が提案されている。現在、海洋開発工学部で実施している実海域実験では、方向スペクトルの計測方法として3台の超音波式波高計からなる直線アレイ方式を用いていることから、比較的少ない波高計アレイでも高い方向分解能を持つ最尤法を用いて解析を行っている。

2.3 最尤法と拡張最尤法

最尤法による方向スペクトルの推定法は、波高計アレイによる水面波形の同時計測を行なう場合を対象として、Capon⁵⁾によって開発されたものである。さらに、磯部⁶⁾はこの推定方法を任意波動量に適用できるように改良し、拡張最尤法を開発した。最尤法と拡張最尤法の原理は同じであるので、ここでは、磯部に従い拡張最尤法について以下にその概要を述べる。

磯部⁶⁾によれば、任意波動量の間のクロススペクトルと波数・周波数スペクトルとの関係は、水面変動に対する各種波動量の伝達関数を用いて次式で与えられる。

$$\Phi_{mn}(\sigma) = \int_{\vec{k}} \mathbf{H}_m(\vec{k}, \sigma) \mathbf{H}_n^*(\vec{k}, \sigma) \times \exp\{i\vec{k}(\vec{x}_m - \vec{x}_n)\} \mathbf{S}(\vec{k}, \sigma) d\vec{k} \quad (2.3.1)$$

ここで、*は共役複素数、 σ は角周波数、 \vec{k} は波数ベクトル、 $\Phi_{mn}(\sigma)$ はm, n間のクロスパワースペクトル、 $\mathbf{H}_m(\vec{k}, \sigma)$ は水面変動に対する波動量の伝達関数、 $\vec{x}_m - \vec{x}_n$ は波動量計測点間のベクトル距離、 $\mathbf{S}(\vec{k}, \sigma)$ は波数・周波数スペクトルを表わす。

今、波数・周波数スペクトルの推定値を $\hat{\mathbf{S}}(\vec{k}, \sigma)$ とする。 $\hat{\mathbf{S}}(\vec{k}, \sigma)$ は、測定されたデータ間のクロス・パワースペクトル Φ_{mn} の線形結合で表わされるとすれば、

$$\hat{\mathbf{S}}(\vec{k}, \sigma) = \sum_m \sum_n \alpha_{mn}(\vec{k}) \Phi_{mn}(\sigma) \quad (2.3.2)$$

となる。ただし α_{mn} は、線形結合の係数である。

ここで、(2.3.1)式を(2.3.2)式に代入すると

$$\hat{\mathbf{S}}(\vec{k}, \sigma) = \int_{\vec{k}'} \mathbf{S}(\vec{k}', \sigma) w(\vec{k}, \vec{k}') dk' \quad (2.3.3)$$

$$w(\vec{k}, \vec{k}') = \sum_m \sum_n \alpha_{mn}(\vec{k}) \mathbf{H}_m(\vec{k}', \sigma) \mathbf{H}_n^*(\vec{k}, \sigma) \times \exp\{i\vec{k}'(\vec{x}_m - \vec{x}_n)\} \quad (2.3.4)$$

となる。つまり、推定される波数・周波数スペクトル $\hat{\mathbf{S}}$ は、真の波数・周波数スペクトルに、ウィンドウ w をかけたものに等しくなる。従って、ウィンドウはデルタ関数に近いほど推定精度が高い。 w をデルタ関数に近づけるために、 $\vec{k} = \vec{k}'$ における w の値を一定に保って、ウィンドウの面積を最小にする操作を行なう。これにより、波数・周波数スペクトルの推定値は

$$\hat{\mathbf{S}}(\vec{k}, \sigma) = x / \left[\sum_m \sum_n \Phi_{mn}^{-1}(\sigma) \mathbf{H}_m^*(\vec{k}, \sigma) \mathbf{H}_n(\vec{k}, \sigma) \times \exp\{-i\vec{k}(\vec{x}_m - \vec{x}_n)\} \right] \quad (2.3.5)$$

となる。ここで、 Φ_{mn}^{-1} は、クロス・パワースペクトル Φ_{mn} で構成される複素行列の逆行列の(m, n)成分である。また、 x は定数であり、次式が満足されるように決定される。

$$\mathbf{S}(\sigma) = \int_{\vec{k}} \hat{\mathbf{S}}(\vec{k}, \sigma) d\vec{k} \quad (2.3.6)$$

ここで、 $\mathbf{S}(\sigma)$ は角周波数スペクトルである。(2.3.5)式で、すべてのmに対して $\mathbf{H}_m = 1$ とすれば、最尤法に一致する。

さて、波数・周波数スペクトルから方向スペクトルを求めるには、(2.3.5)式を周波数 f と波向 θ の表示に変換する必要がある。

いま、波数ベクトル \vec{k} 、波動量計測点間のベクトル距離 $\vec{x}_m - \vec{x}_n$ を、波数 k 、波向 θ 、波動量計測点の座標 (x_m, y_m) を用いて

$$\vec{k} = (k \cos \theta, k \sin \theta) \quad (2.3.7)$$

$$\vec{x}_m - \vec{x}_n = (x_n - x_m, y_n - y_m) \quad (2.3.8)$$

と表示し、波数 k は次の分散関係式

$$\sigma = (2\pi f)^2 = g k \tanh(k h) \quad (2.3.9)$$

を用いて、周波数 f から一義的に定まるとする。ここで、 g は重力加速度、 h は水深を表わす。(2.3.5)式は

$$\hat{\mathbf{S}}(k, f) = x / \left[\sum_m \sum_n \Phi_{mn}^{-1}(f) \mathbf{H}_m^*(k, f) \mathbf{H}_n(k, f) \times \exp\{ik[(x_m - x_n) \cos \theta + (y_m - y_n) \sin \theta]\} \right] \quad (2.3.10)$$

となり、方向スペクトル $\mathbf{S}(f, \theta)$ が求められることになる。

実際に方向スペクトルを推定するには、あらかじめ周波数 f を特定することで(2.3.9)式から波数 k を求め、さらに波形データからクロススペクトルを求めることで、(2.3.10)式を用いて推定することができる。

3. 最尤法に対する検討

3.1 数値シミュレーション

図-2.1.1に示す波高計配置に対する最尤法の適用性について検討を加える手段として、数値シミュレーションを行い、実際に方向スペクトルを推定する方法が考えられる。数値シミュレーションの方法としては、実際にある方向分布関数をもつ水面波形を模擬した時系列から方向スペクトルを推定する方法とクロススペクトルと方向スペクトルの関係式(2.3.1)式を用いて、与えられた真の方向スペクトルから直接クロススペクトルを求めて方向スペクトルの推定値を求める方法がある。

前者の方法では、時系列からクロススペクトルを求めるわけであるが、クロススペクトルを計算する際にその計算方法による誤差が混入し、最尤法自体の推定精度を定量的に把握するのは難しい。従って、ここでは最尤法の推定精度を定量的に把握することを目的とし、(2.3.1)式を用いて数値シミュレーションを行なうことにした。計算に用いた座標系、波の主方向 θ_p は図-3.1.1に示すように定めた。

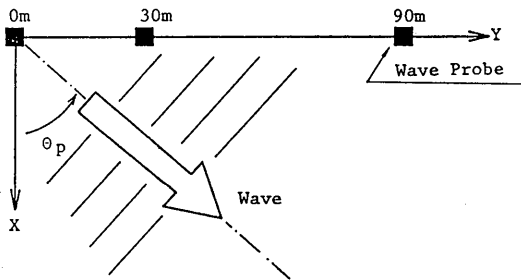


図-3.1.1 座標系

方向スペクトル $S(f, \theta)$ は、通常、周波数スペクトル $S(f)$ と方向分布関数 $G(\theta, f)$ を用いて次のように表示される。

$$S(f, \theta) = S(f) \cdot G(\theta, f) \quad (3.1.1)$$

今回のシミュレーションでは、周波数スペクトルの表示式として次のmodified Pierson-Moskowitz型波スペクトルを用いた。

$$S(f) = 0.11 H_{1/3}^2 T_{H1/3} (T_{H1/3} f)^{-5} \times \exp(-0.44 (T_{H1/3} f)^{-4}) \quad (3.1.2)$$

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{H1/3}$ は有義波周期である。また、方向分布関数としては、次の光易型方向関数を用いた。

$$G(\theta, f) = G'(t) \cos^{2t} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \right) \quad (3.1.3)$$

ここで、 G' は、正規化関数であり、次式で表わせる

$$G'(t) = \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2t} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (3.1.4)$$

また、 t は、波のエネルギーの方向分布の集中度を表わすパラメーターであり、ここでは合田⁹⁾に従い、 t の最大値 t_{max} と周波数スペクトルのピーク周波数 f_p をパラメーターとして、次式で表わすことにする。

$$t = \begin{cases} t_{max} (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ t_{max} (f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad (3.1.5)$$

なお、ピーク周波数 f_p は

$$f_p = 1 / (1.05 \cdot T_{H1/3}) \quad (3.1.6)$$

の関係を用いた。

シミュレーションは次の条件で行なった。

$$H_{1/3} = 5.0m, \quad T_{H1/3} = 10.74sec$$

$$t_{max} = 10, 25, 75$$

$$\theta_p = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$$

図-3.1.2~図-3.1.4~にシミュレーション結果を示す。縦軸には方向分布関数、横軸には入射角をとっている。図中の実線は、入力した方向分布関数、破線は最尤法による推定値であり、いずれも $f=0.084$ Hzでの結果である。なお、直線アレイの場合、アレイに対して入射波が前方あるいは後方より入射したのか判別できないため、 $\theta = -90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で示した。

まず、図-3.1.2は、 $t_{max}=10$ で、 θ_p を $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ と変化させた時の解析結果であり、図-3.1.3は、 $t_{max}=25$ 、図-3.1.4は、 $t_{max}=75$ とした時の解析結果である。これらの結果から次のことがわかる。

1) 最尤法による推定値は、入力値のピーク付近で推定精度が低下する傾向が見受けられるが、入力した方向分布関数の形状を比較的良好に推定することができる。

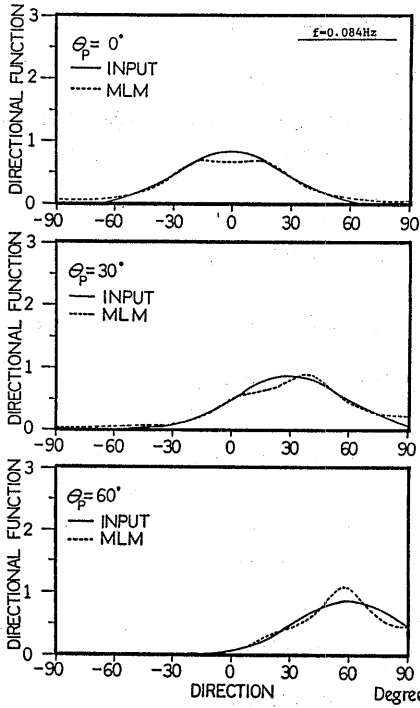


図-3.1.1.2 シミュレーション結果 ($t_{max}=10$)

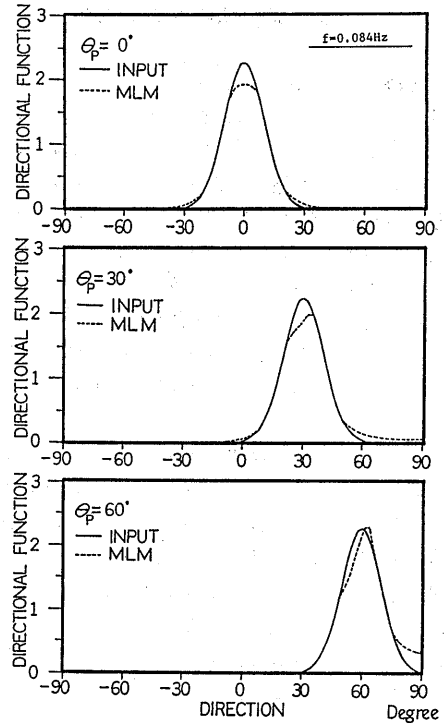


図-3.1.1.4 シミュレーション結果 ($t_{max}=75$)

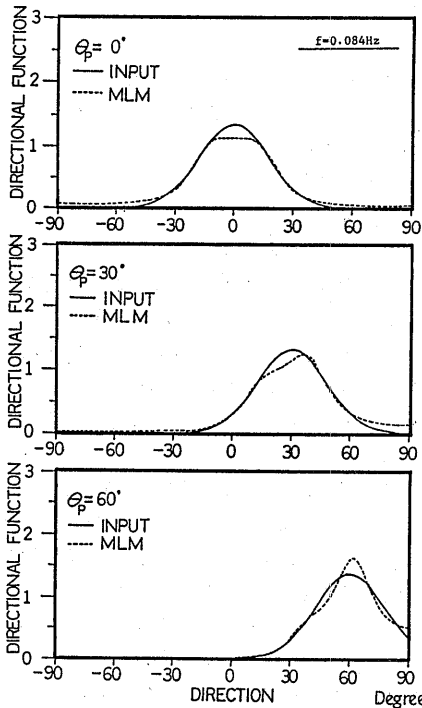


図-3.1.1.3 シミュレーション結果 ($t_{max}=25$)

2) 推定した方向分布関数は、 θ_p が 0° からずれるにつれて、左右非対称にひずむ傾向がある。

3) 特に、 t_{max} が小さい場合には、 θ_p が 0° からずれるに伴い、推定値は入力値よりエネルギーの方向集中度を高め評価する傾向がある。

以上、方向スペクトルの計測方法として、3台の波高計による直線アレイ方式を用いた場合、解析方法として最尤法を用いれば、方向分布関数のピーク付近で推定精度が僅かに低下する傾向があるが、ほぼ方向分布関数を推定できることがわかった。

3.2 水槽実験

実海域で計測された波浪データから方向スペクトルを推定するには、計測器の計測誤差あるいはノイズ、波形データからクロススペクトルを計算する際の解析法上の誤差、さらにはクロススペクトルから方向スペクトルを推定する際の推定法の誤差などがあり、それらを全て含めた状態で、方向スペクトルの推定精度を評価するのはなかなか困難である。方向スペクトルの推定精度を評価する方法としては、水面波形を模擬し

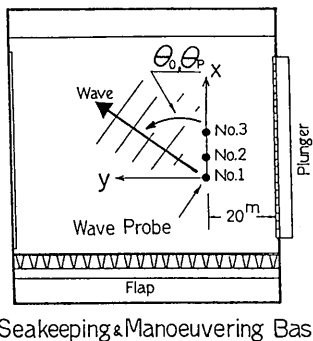
さらにその波形に人工的なノイズを加えて方向スペクトルの推定精度を評価する方法¹⁾などがあるが、ここでは、実際に水槽で波を発生させて、波高計から取得したデータから最尤法を用いて方向スペクトルの推定を行なってみた。

また、合わせて、簡易な方向スペクトルの計測法の開発を目的として、浮遊式海洋構造物「POSEIDON」号14分の1の模型を用いて、係留された海洋構造物の相対水位から方向スペクトルを推定する実験も行なった。

3.2.1 実験の概要

実験は、三鷹第一船舶試験水槽の第二面造波機で、23種類の規則波、不規則波を発生させ、3台の容量式波高計による絶対水位計測実験、「POSEIDON」号14分の1の模型の4箇所に取り付けた容量式波高計による相対水位計測実験の2種類を行った。使用した不規則波は、すべてmodified Pierson-Moskowitz型波スペクトルをもつ不規則波である。

絶対水位計測実験で用いた3台の容量式波高計の配置と解析に用いた座標系とを図-3.2.1に示す。図中



Seakeeping & Manoeuvring Basin

図-3.2.1 絶対水位計測実験の波高計の配置と座標系

の θ_0 は一方方向不規則波および二方向不規則波の波向き、 θ_p は多方向不規則波の主方向を表わす。波高計は、第二面造波機の前方20mところに設置し、それぞれの波高計の間隔は、今回用いた模型の縮尺をもとに、実海域実験で予定している波高計の間隔の14分の1とした。

相対水位計測実験で用いた4台の容量式波高計は、図-3.2.2に示すような配置で模型に取り付けた。模型の設置場所は、第二面造波機の前方30mとこ

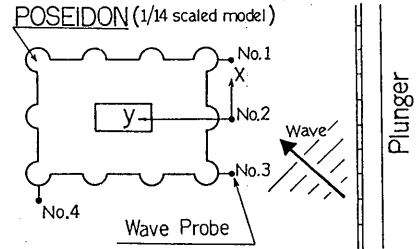


図-3.2.2 相対水位計測実験の波高計の配置と座標系

る。この実験では、模型の相対水位のほかに、相対水位計測点での上下方向の加速度も計測している。

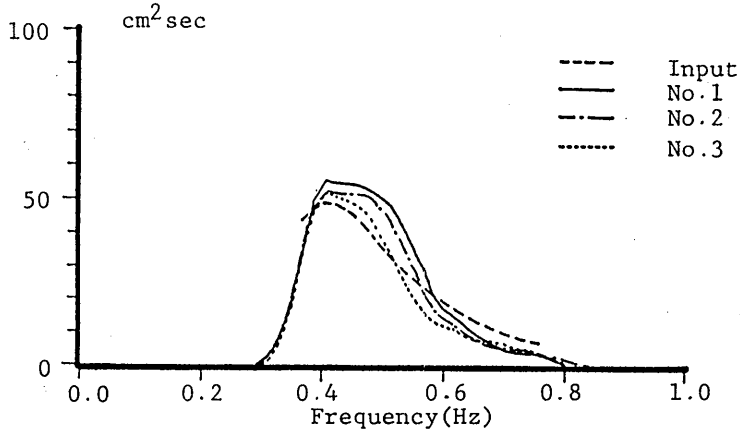
3.2.2 データ解析

計測データは全ての計測項目を、アナログデータレコーダーに収録した。収録時間は、規則波の場合約50秒、不規則波の場合反射波の影響を考慮し約100秒とした。また、一つの造波信号について5回の収録を行なっている。データ解析に際して、まず、計算機を用いてA/D変換をおこなった。この時のサンプリング時間は、0.05秒であり、規則波については512個のデータ、不規則については1024個のデータとして解析を行なった。クロススペクトルは、FFT法を用いて計算し、方向スペクトルを求める際には、5回の計測値から求められたクロススペクトルの平均値を用いた。

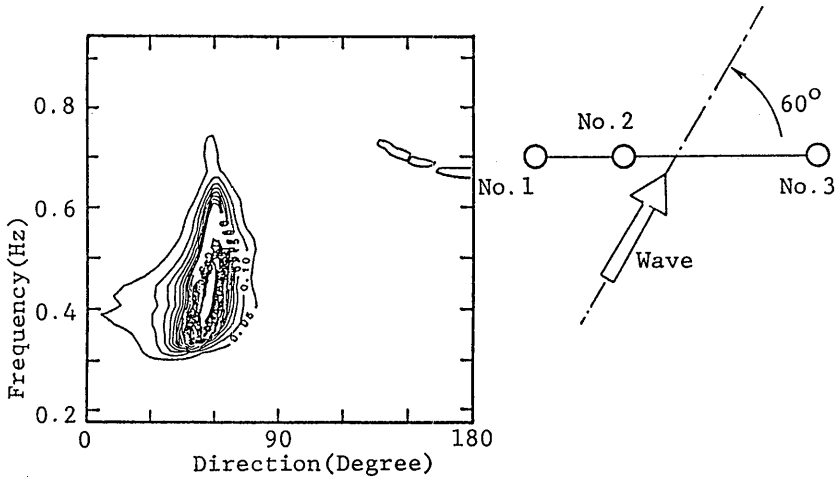
相対水位計測実験で計測された相対水位には、模型の動揺成分が含まれている。この動揺成分を除去するために、各相対水位計測点での加速度から上下変位を求め、相対水位から動揺成分を除いている。加速度を変位に変換する際には、加速度の時系列をフーリエ変換し、各成分波に対して振幅を周波数 f^2 で割り、位相を π だけ修正した後、さらに逆フーリエ変換を行って変位の時系列に変換している。

3.2.3 絶対水位による方向スペクトルの推定結果

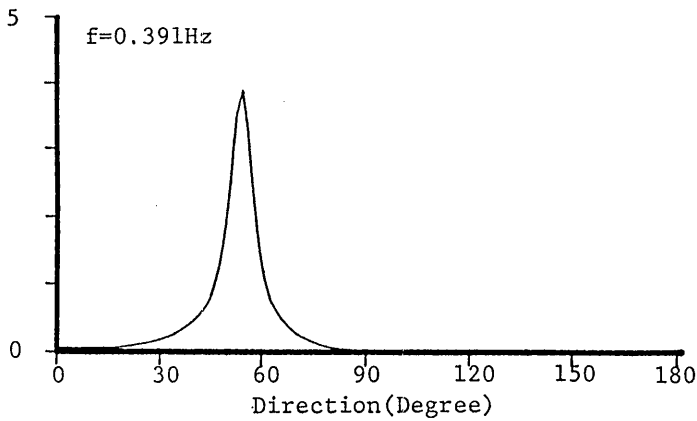
代表的な解析結果を、図-3.2.3~図-3.2.6に示す。これらの図の(a)は、3台の波高計から取得したそれぞれの波形データのパワースペクトルであり、いずれも5回の計測の平均値である。(b)は、推定した方向スペクトルを等高線図で表わしたものであり、縦軸に周波数、横軸に入射角をとっている。なお、ここでは、波高計の配置を直線アレイとしたために、方向スペクトルの推定は、 $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲でしか行っていない。(c)は、ピーク周波数の付近で、方向スペクト



(a) Power Spectrum

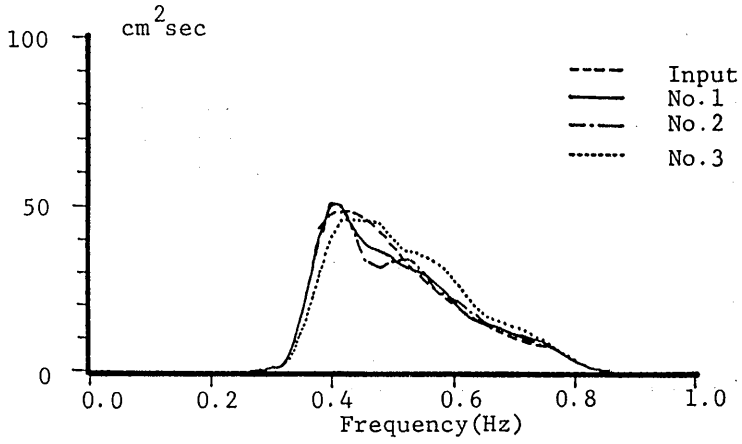


(b) Directional Spectrum

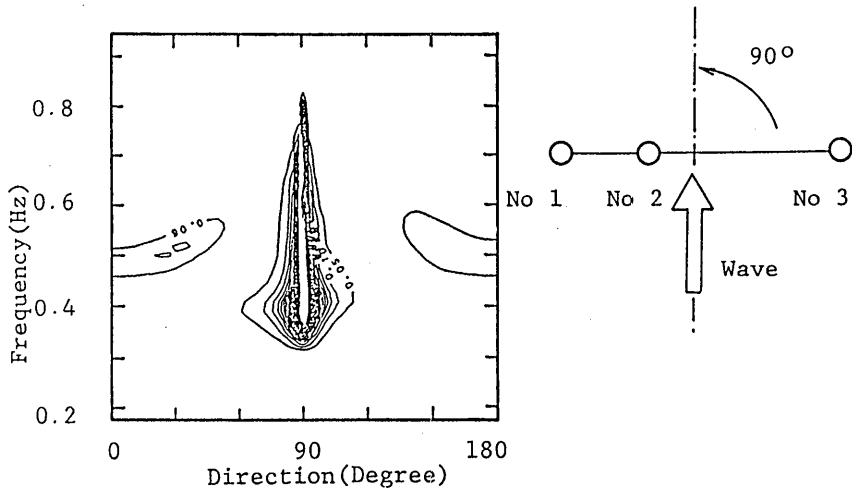


(c) Directional Function

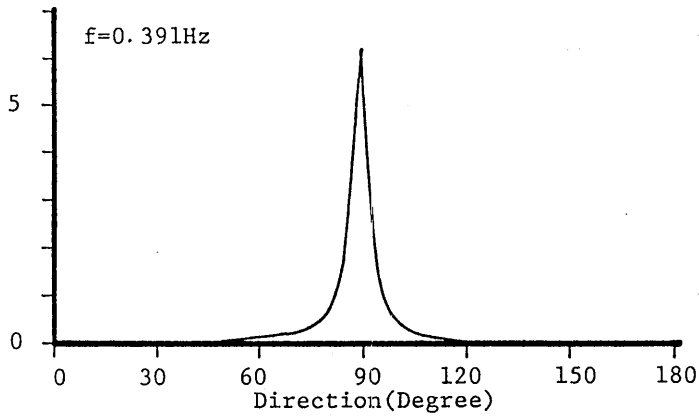
図-3.2.3 一方向不規則波の解析結果 ($\theta_0=60^\circ$)



(a) Power Spectrum

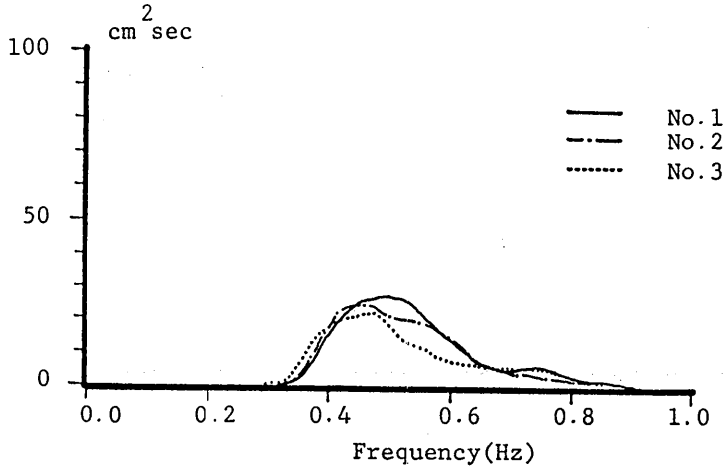


(b) Directional Spectrum

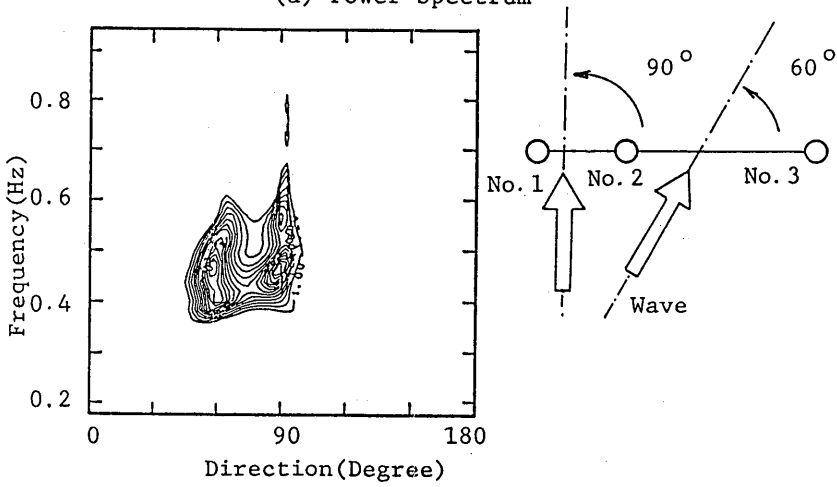


(c) Directional Function

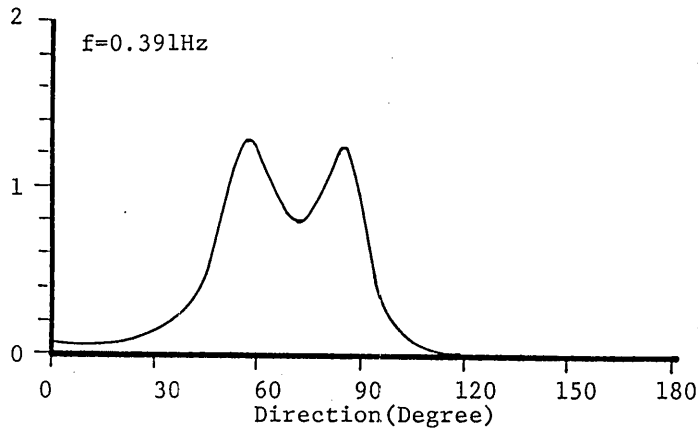
図-3.2.4 一方向不規則波の解析結果 ($\theta_0 = 90^\circ$)



(a) Power Spectrum

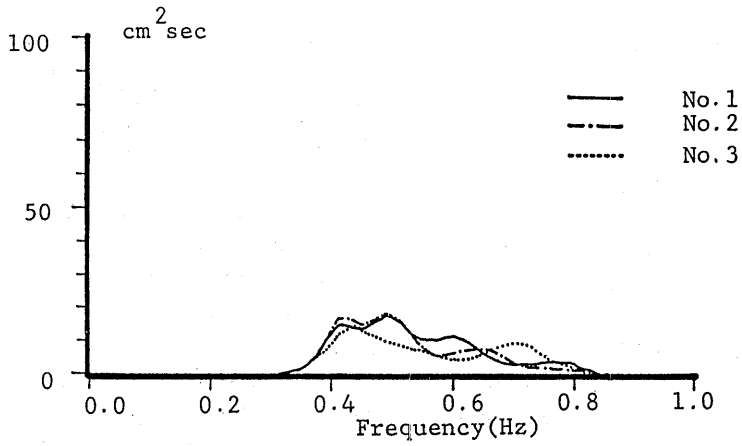


(b) Directional Spectrum

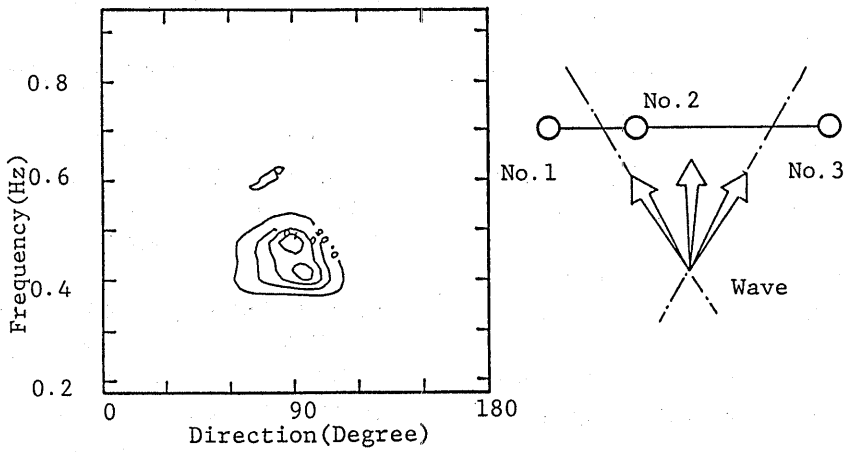


(c) Directional Function

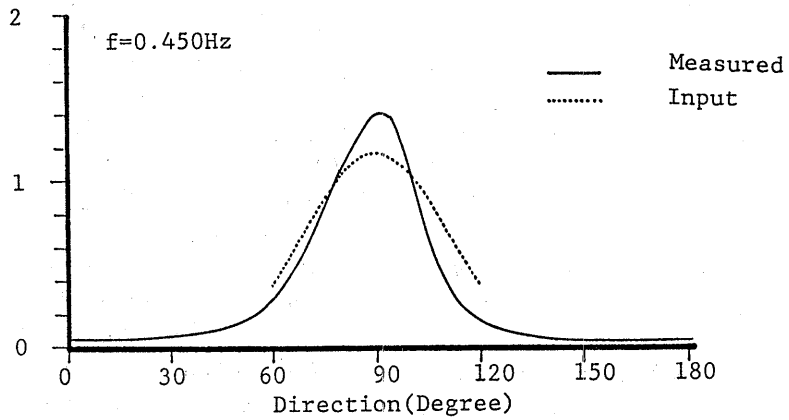
図-3.2.5 二方向不規則波の解析結果 ($\theta_0 = 60^\circ, 90^\circ$)



(a) Power Spectrum



(b) Directional Spectrum



(c) Directional Function

図-3.2.6 多方向不規則波の解析結果 ($\theta_p=90^\circ$)

ルの方向分布関数を求めた結果であり、縦軸に方向分布関数、横軸に入射角をとっている。

(1)一方向不規則波

図-3.2.3 および図-3.2.4 は、それぞれ $\theta_0=60^\circ, 90^\circ$ にエネルギーの集中した線スペクトルを持つ一方向不規則波の解析結果である。

まず、(a)から、3台のそれぞれの波高計から求めたパワースペクトルは、入力した造波信号とよく一致している。

次に、(b)から、 $\theta_0=60^\circ$ の解析結果は、低周波数領域で、方向スペクトルのピークが、 60° より小さな角度の方向にずれる傾向にあり、エネルギーの分布の集中度も低くなっている。これに対し、 $\theta_0=90^\circ$ の場合には、 90° 方向へのエネルギーの集中度が非常に高く、入射波が $\theta_0=90^\circ$ 方向の単一方向不規則波であることを示している。

(c)から、 $\theta_0=90^\circ$ の場合の方向分布関数のピーク値は6.2、 $\theta_0=60^\circ$ のときは4.1であり、 $\theta_0=60^\circ$ の方が、エネルギーの集中度が低く、方向分解能の低下が見られる。これは、波が入射してくる方向がアレイに対して平行になるにつれて方向分解能が低下する直線アレイの特性によると考えられるが、全体的に見て、一方向不規則波の場合には、線スペクトルの特性はよく表わしているといえる。

(2)二方向不規則波

図-3.2.5 は、 θ_0 が $60^\circ, 90^\circ$ にエネルギーの集中した線スペクトルを持つ二方向不規則波の解析結果である。

(a)から、3台の波高計のパワースペクトルは、ほぼ一致していることがわかる。

(b)方向スペクトルと(c)の方向分布関数から、入射波は、 60° と 90° にエネルギー集中した二方向不規則波であることが、明瞭に検出されている。しかしながら、方向分布関数のピーク値は、一方向不規則波の場合と比較してみると1.3と低く、また、入射波のピークから約 5° 程度ずれていることが判る。

(3)多方向不規則波

図-3.2.6 は、方向分布関数として \cos^2 分布($\theta_0=90^\circ$)を持つ多方向不規則波を発生させた場合の解析結果である。

(c)の破線は入力した方向分布関数、実線は最尤法による推定結果を表わしている。この図から、最尤法を用いて推定した方向分布関数は、入力した方向分布関数を高めに評価している。これは、クロススペクトル

ルの統計的変動、あるいは方向分布関数のピーク付近で推定精度が低下する最尤法の特性に起因するものと考えられる。また、実際にはエネルギーが存在していない $\theta < 60^\circ$ と $\theta > 120^\circ$ の範囲にもエネルギーが分布していることがわかる。(2.3.1)式を用いた数値シミュレーションでも、最尤法による方向スペクトル推定結果は、実際はエネルギーの存在しない方向にも若干エネルギーが分散する傾向があり、最尤法の特性によるものと考えられる。

(4)考察

以上の絶対水位計測実験から、一方向不規則波の場合、最尤法は優れた分解能をもつことを確認できた。一方、二方向不規則波の場合には、二つのピークは検出できるが、分解能が低下する傾向があることもわかった。また、多方向不規則波の実験は一例ではあるが、最尤法による結果は、方向分布関数のピーク付近でのエネルギーの集中度を高めに評価する傾向が見受けられる。

しかしながら、実海域実験で3点アレイを用いて波の計測を行なった場合、最尤法を用いて入射波の波向きを的確に捕らえることができることを、水槽実験でもシミュレーションと同様に確認できた。

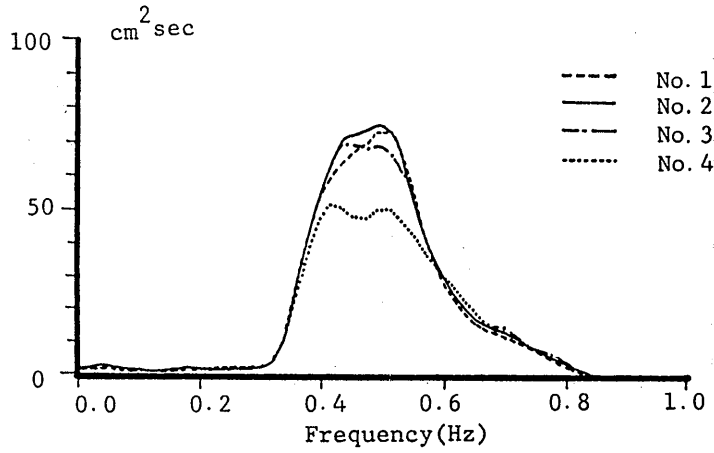
3.2.4 相対水位による方向スペクトルの推定結果

解析結果を、図-3.2.7と図-3.2.8に示す。これらの図の(a)は、4台の波高計から得られた波形データから模型の動揺成分を除去した後、それぞれの波のパワースペクトルを求めた結果であり、5回の計測の平均値である。(b)は、推定した方向スペクトルを等高線図で表わしたものであり、縦軸に周波数、横軸に入射角をとっている。(c)は、ピーク周波数の付近での方向スペクトルについて、方向分布関数を求めた結果である。なお、この場合には、原理的には $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲で方向スペクトルを推定することが可能であるが、絶対水位計測実験と対比させるために $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で方向スペクトルの推定を行なった。

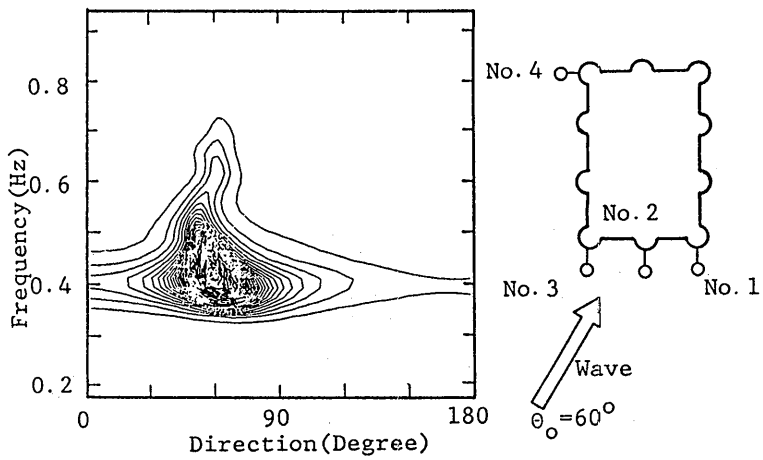
(1)一方向不規則波

図-3.2.7 は、 $\theta_0=60^\circ$ の場合の一方向不規則波の解析結果である。この場合の造波条件は、絶対水位計測実験の一方向不規則波 $\theta_0=60^\circ$ の場合と同じである。

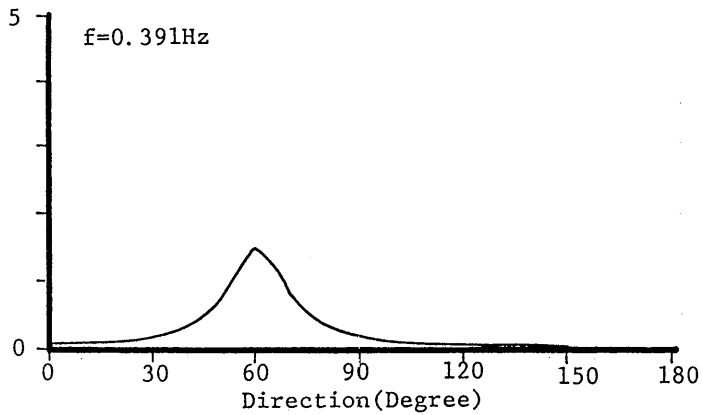
まず、前述の図3.2.3(a)と、図3.2.7(a)を比較すると、絶対水位からのパワースペクトルに比べ、NO.1~NO.3のパワースペクトルはピーク付近でほぼ30~40%大きくなっており、相対水位から模型の上



(a) Power Spectrum

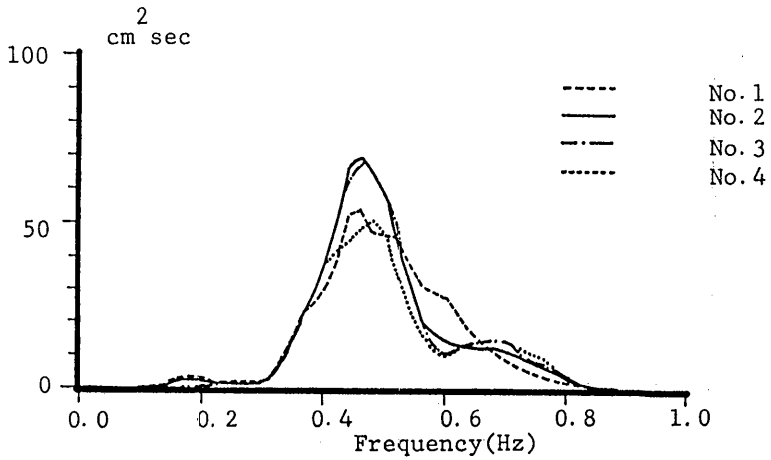


(b) Directional Spectrum

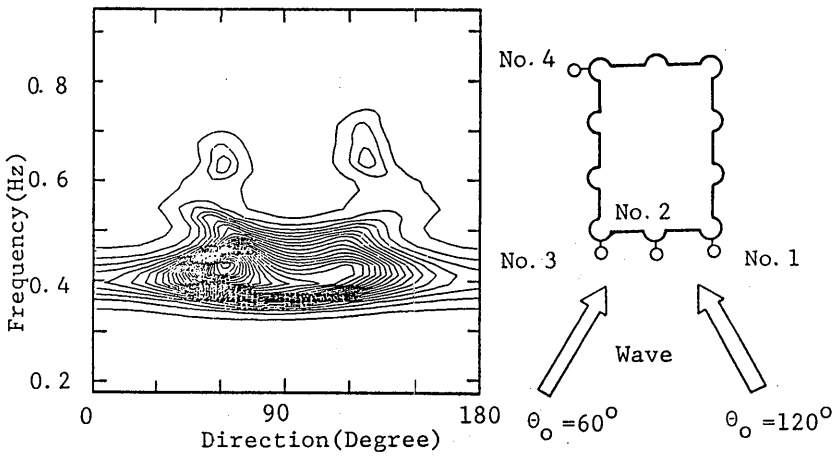


(c) Directional Function

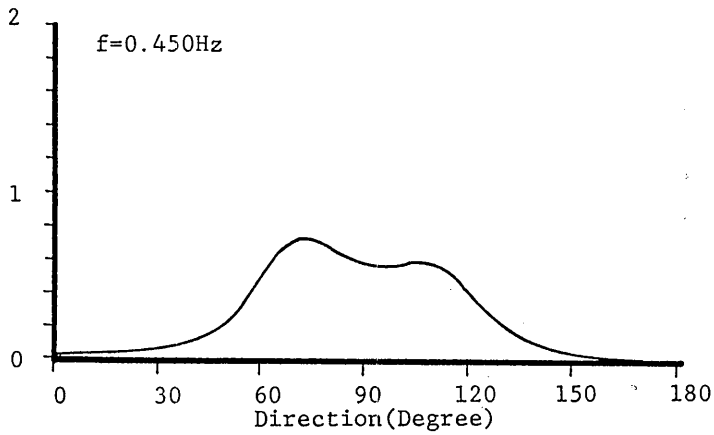
図-3.2.7 一方向不規則波の解析結果 ($\theta_0 = 60^\circ$)



(a) Power Spectrum



(b) Directional Spectrum



(c) Directional Function

図-3.2.8 二方向不規則波の解析結果 ($\theta_0 = 60^\circ, 90^\circ$)

下方向の動揺成分だけを除去しても、完全に動揺影響を除去しきれていないことを伺わせる結果となっている。

また、(c) からは、推定値は進行波の波向を検出しているが、その集中度は低く、波高計の数が4台であるにもかかわらず、絶対水位の解析の場合と比べて、入力波の線スペクトルの特性を表わしきれていないことが判る。

(2)二方向不規則波

図-3.2.8は、60°と120°の方向へ進む二方向不規則波の解析結果である。この場合も、二つの進行波を検出してはいるが、単一方向波の場合と同様に、入力波の線スペクトルの特性を表わしきれていないことが判る。図-3.2.8(b)から、120°の方向の波は模型のコラムによって遮蔽されており、NO.4の波高計は、この遮蔽影響を受けている可能性がある。この影響のために、クロススペクトルを十分な精度で計算することができず、方向スペクトルの推定精度が低下したものと考えられる。

(3)考察

以上、相対水位実験では、絶対水位実験と比較して推定精度が低下することが判った。これは、先にも述べたが、模型の上下揺れの以外の動揺成分(前後揺れ、左右揺れなど)の影響、さらには、入射波の波向によってはコラムの遮蔽影響など、種々考えることができる。しかし、今回の実験で、実際の係留された海洋構造物において、その相対水位と加速度が計測できれば、16方位で表示できる程度には、入射波の波向を検出することが可能であることがわかった。

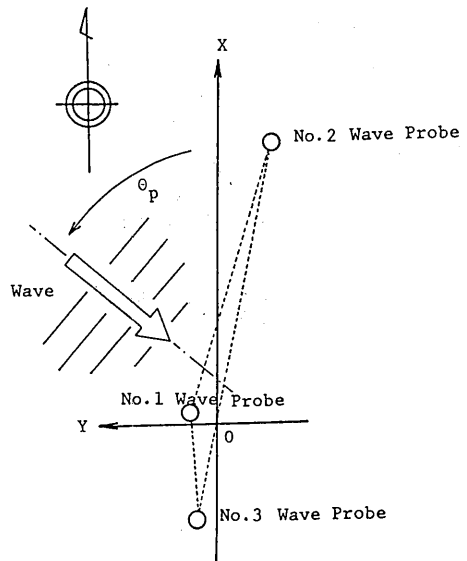
4. 実海域実験データの解析

4.1 波高計の配置とデータ収録

浮遊式海洋構造物「POSEIDON」号は、現在、山形県鶴岡市由良沖約3kmの海域に船首を西北西に向けて係留されている。3台の超音波式波高計は、POSEIDON号船首側約180m前方の水深約40mの海底に設置されている。当初の予定では、波高計の配置は直線アレイとする予定であったが、実際に設置した結果は、直線に近い三角形アレイとなった。方向スペクトルの推定に用いた座標系及び方位を図-4.1.1に示す。

今回計測に用いた波高計は、海底設置式の送受波器を持つ大水深型超音波式波高計(海上電機(株)製)

であり、これは、海底の送受波器より超音波パルス(200kHz)を発射し、そのパルスが、海面で反射して送受波器に戻ってくるまでの時間を計測し時々刻々の波高の変化を得るものである。波高計の仕様を表-4.1.1



波高計	x(m)	y(m)	水深(m)
No.1	2.5	6.1	42.0
No.2	66.6	-12.3	42.0
No.3	-22.9	4.2	42.0

図-4.1.1 座標系と方位

表-4.1.1 超音波式波高計の仕様

波高計(USV-132B型)	
測定方式	超音波パルス伝播時間測定方式
測定レンジ	20m
精度	±1%(F.Sに対して)水温変化による誤差15°C±10°Cに対して±2.5%
測定繰り返し数	170ms毎
使用水深範囲	ラッチ方式 29~55m
出力	アナログ記録計用±5volt

送受波器(TU-338型)	
超音波指向	200kHz
周波数	半波半角3°
振動子	チタバリ100φ

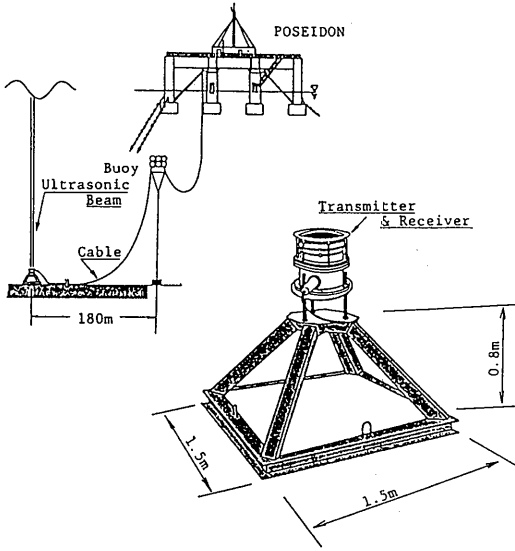


図-4.1.2 波高計の設置方法

に示す。この送受波器の海底設置の際には、図-4.1.2の右下に示すような取付台を作製し、これに送受波器を取り付けて、海底に投入した。海底に設置された送受波器は、海底ケーブルによってPOSEIDON号上の本体装置に接続されており、海底ケーブルには、POSEIDON号の運動などによるケーブルの摩擦あるいは切断等を防止するために中間ブイを取り付けている。

波形データの取得は、昭和62年11月2日より現在まで1日に4回の定時計測(5時, 11時, 17時及び23時),あるいは臨時計測などにより順調に行なわれている。波浪データは、パソコンでA/D変換を行なった後、ハードディスクに書き込んでいる。サンプリング時間は、0.5秒間隔で約34分間であり、一回の定時計測で4096個のデータを取得している。

4.2 データ解析

解析は、トレンド除去とノイズ除去の前処理を行なった後、4096個のデータを1024個ごとの4つのデータに分割して行なった。ノイズ除去はスパイク状のノイズを対象とし、波形の時間微分値をノイズ発生の判定基準とする方法¹⁰⁾を用い、波形データからスパイク状のノイズを除去した後は、直線補間を行なっている。また、スペクトルの計算にはFFT法を用いており、パワースペクトルとクロススペクトルは4つに分

割したデータの平均値として求め、さらに、Hamming-Windowを用いて平滑化を行なっている。方向スペクトルの推定は、280°(北を0°にとり、時計方向に280°)を中心にして±90°の範囲で行なっている。

4.3 方向スペクトルの推定結果

今回の解析の対象としては、昭和62年11月2日から現在までの計測データの中で、代表的なケースとして昭和62年11月19日23時,昭和63年2月3日17時のデータを選んだ。当時の風と波浪データの統計量の経時変化を、図-4.3.1に示す。この図から判るように、いずれも平均風速10~15m前後の西北西の強風が、12時間程度にわたって吹き続けており、波向きは西あるいは西北西と推定される。

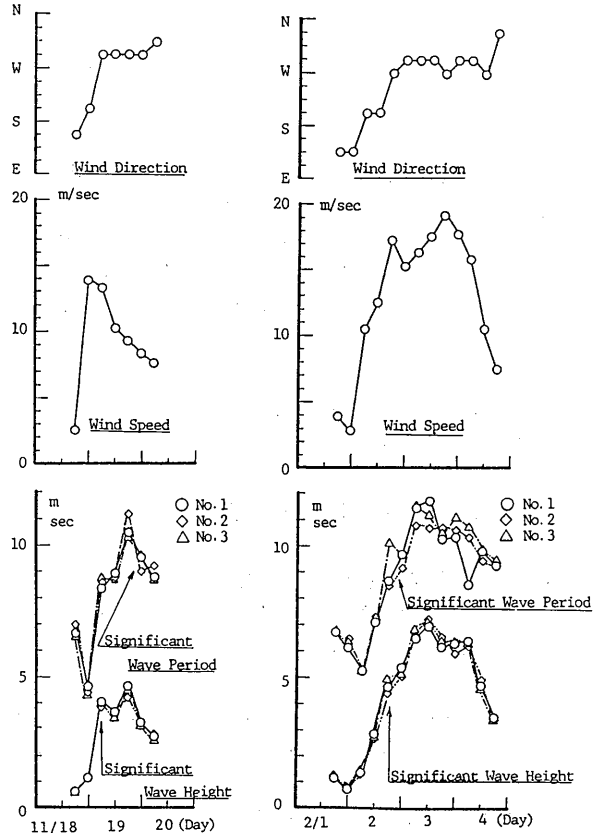


図-4.3.1 風と波の統計量の経時変化

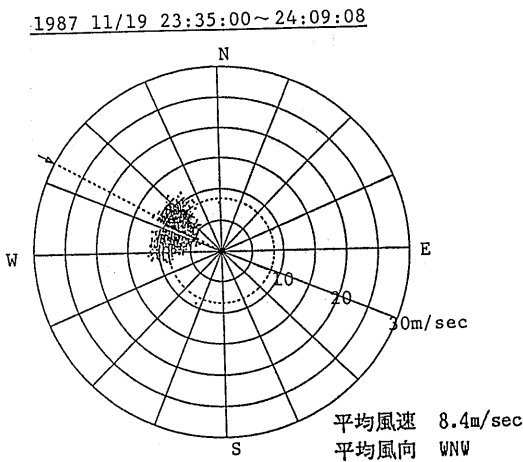
図-4.3.2と図-4.3.3に解析対象とした定時計測データの風の風向風速分布と波浪データのゼロクロス解析の結果を示し、また図-4.3.4と図-4.3.5には、その時の方向スペクトルの推定結果を示す。図-4.3.4、図-4.3.5の(a)と(b)は、方向スペクトルの推定結果を鳥瞰図と等高線図の形に表わしたものであり、図中のW、Nは方位を表わしている。

まず、図-4.3.4と図-4.3.5から、方向スペクトルの推定結果は周波数に対してかなり変動しているが、推定値のピークは2ケースともほぼNW付近であることがわかる。これに対して、図-4.3.2と図-4.3.3に示す風の統計解析の結果から、当時の平均風向はWNWとWであり、成分波は風とほぼ同じ方向に伝播しているものと考えられる。

次に、図-4.3.6は、11月19日23時の解析結果に

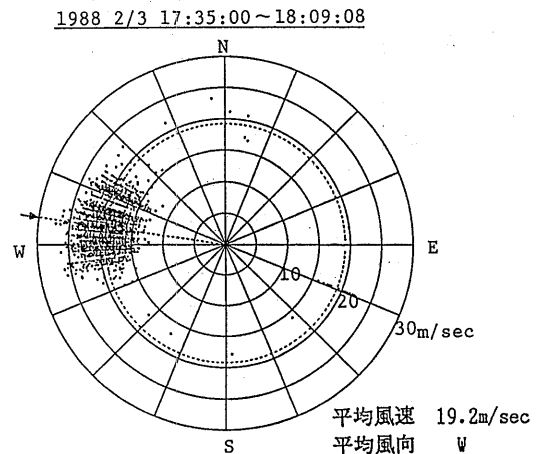
ついて、周波数スペクトル(3台の波高計の平均値)のピーク周波数 $f_p=0.091$ Hzで方向分布関数を求めた結果であり、横軸は方位、縦軸は方向分布関数である。図中の破線と一点鎖線は、光易型方向関数で $t=10$ と 20 とした場合である。この図からピーク周波数での方向分布関数の形状は単一のピークを示し、光易型方向関数で $t=10\sim 20$ に近くなっていることが判る。

図-4.3.7は、2月3日17時の解析結果について、 $f_p=0.084$ Hzで方向分布関数を求めた結果であり、図中の破線と一点鎖線は、光易型方向関数で $t=30$ と 40 とした場合である。この時の方向分布関数の形状も、11月19日の結果と同様に単一のピークを示しているが、エネルギーの方向集中度がかなり高くなっており、光易型方向関数では $t=40$ に近くなっていることがわかる。



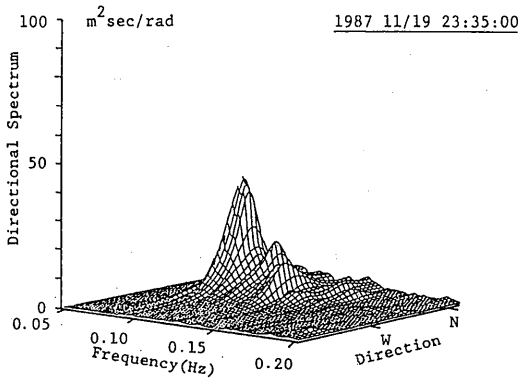
	No.1波高計	No.2波高計	No.3波高計
H_{max}	5.84m	6.20m	5.91m
$H_{1/10}$	4.22m	4.23m	3.99m
$H_{1/3}$	3.28m	3.16m	3.20m
T_{Hmax}	10.02sec	9.97sec	9.73sec
$T_{H1/10}$	9.49sec	9.55sec	10.08sec
$T_{H1/3}$	9.53sec	9.00sec	9.60sec

図-4.3.2 風向風速分布と波のゼロクロス解析結果
(11月19日23時)

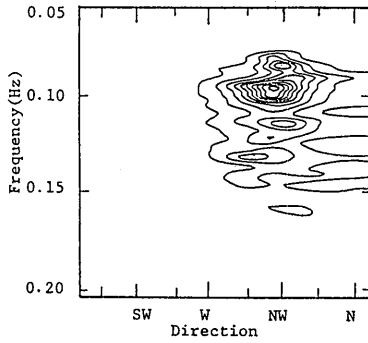


	No.1波高計	No.2波高計	No.3波高計
H_{max}	9.25m	10.91m	10.41m
$H_{1/10}$	7.31m	7.97m	8.15m
$H_{1/3}$	6.11m	6.59m	6.55m
T_{Hmax}	11.99sec	9.96sec	9.58sec
$T_{H1/10}$	10.40sec	10.01sec	10.87sec
$T_{H1/3}$	10.34sec	10.77sec	10.60sec

図-4.3.3 風向風速分布と波のゼロクロス解析結果
(2月3日17時)

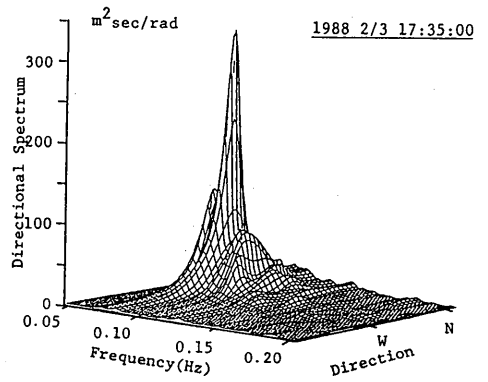


(a) Birds-eye View

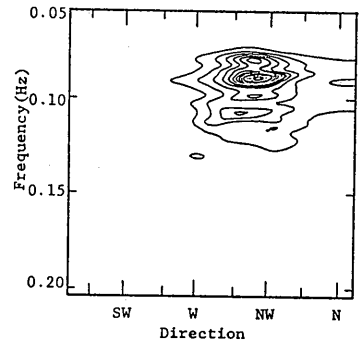


(b) Contour Curves

図-4.3.4 方向スペクトルの推定結果 (11月19日23時)



(a) Birds-eye View



(b) Contour Curves

図-4.3.5 方向スペクトルの推定結果 (2月3日17時)

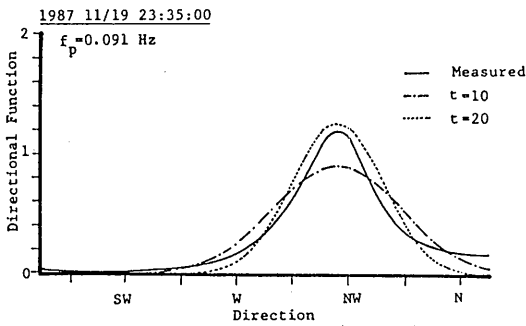


図-4.3.6 方向分布関数 (11月19日23時)

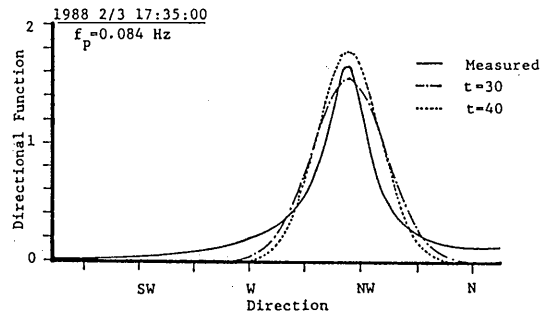


図-4.3.7 方向分布関数 (2月3日17時)

4.4 冬期波浪の波向き分布

以上、実海域実験での波浪データの解析結果の代表例を示した。現在、最尤法は実海域実験データの一次解析プログラムに組み込まれており、方向スペクトルの解析に用いられている。その解析結果については、現在、詳細な検討を行なっており、ここではその検討結果の一例を報告する。

図-4.4.1 (a) は、昭和62年12月から昭和63年2月までの冬期3ヶ月間で、取得した波浪データ(347ケース)のうち、有義波高が2mを越えるケース(148ケース)について、その波向きの分布を求め、さらに16方位ごとにその度数分布を求めた結果である。また、(b)は、この有義波高が2mを越えるケースの平均風速の分布も示している。図の横軸は方位、縦軸は度数である。なお、ここで用いている波向きとは、Longuet-Higgins¹³⁾によって定義された平均波向きであり、方向スペクトルの一次モーメントから求めることができる。

まず、(a)より、有義波高が2mを越えるケースの出現は、ほぼWNWからNWに限られておることが判

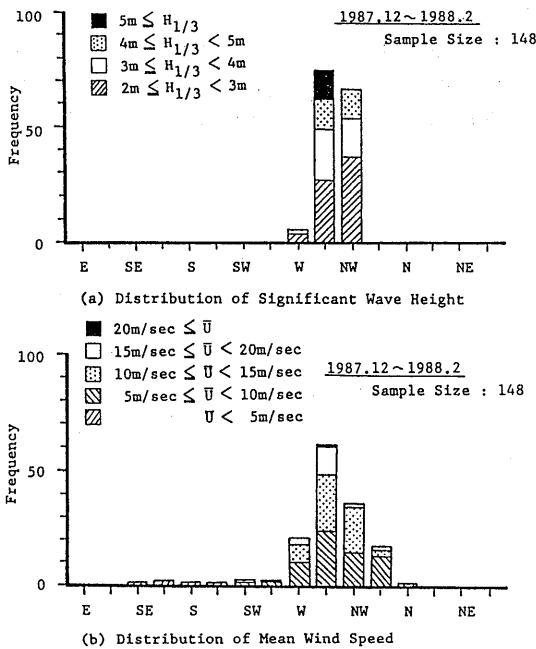


図-4.4.1 有義波高と平均風速の方位別分布

る。特に、有義波高が5mを越えるような大波高の出現するケースは、WNWに限られていることが判る。また、(b)より、有義波高と平均風速の分布を対比させれば、両者の分布には相関があることが判る。

5. 結言

実海域での方向スペクトルの計測手法として、波高計アレイによる定点計測法を用いた。さらに方向スペクトルの解析方法として最尤法を採用し、数値シミュレーション、並びに水槽実験を行ない、実海域実験データへの最尤法の適用性について検討を行なった。その結果、次の事項が明らかになった。

1) 最尤法は、進行波向の検出という点で実用上十分であり、3点アレイでも2方向に進む波を的確に検出することができる。

2) 最尤法による推定値は、入力値のピーク付近で推定精度が低下する傾向があるが、波がアレイに対しほぼ直角に入射した場合は、入力した方向分布関数の形状を比較的良好に推定できる。

3) t_{max} が小さい場合には、入力した方向分布関数の主方向が、アレイに対して直角からずれるにつれて、推定精度が低下する傾向がある。

4) 係留された海洋構造物の相対水位から方向スペクトルを推定する方法について水槽実験を行なった結果、進行波向の検出は十分に行なえることがわかった。

5) 実海域実験で取得されたデータに対して最尤法を適用し方向スペクトルを推定を行なった。今回のケースでは方向スペクトルのピークは、この時の平均風向とほぼ一致していることが判った。

6) 方向分布関数については、計測器の精度やノイズ、クロススペクトルの推定精度、最尤法自体の推定精度などの問題もあり、その形状を議論するのは難しいが、解析した2ケースについては、ピーク周波数付近での形状は、光易型方向関数に近いことがわかった。

7) 冬期波浪の波向き分布を求めた結果、この海域では、有義波高が2mを越えるケースの出現は、ほぼWNWに限られていることが判った。また、一つの試みとして、その時の平均風速と平均波向きの分布を対比させた結果、両者はよく対応していることが判った。

以上、第一報として、実海域での波の方向スペクトルの計測方法と解析方法に対する検討、実海域実験データの解析結果の代表例を示し、さらに冬期波浪の平均波向きの分布状況を調べた。現在、波の方向スペ

クトルのデータは、実海域における数少ない長期計測データとして着実に蓄積されつつあり、目下詳細な検討を進めている。本報告では、その一例として冬期波浪の平均波向き分布を示したが、詳細については、第二報として報告する予定である。

最後に、本研究での数値計算および実験データの解析は、中央計算機ACOS 910を使って行なったことを付記する。

謝辞

本研究を実施するにあたり、多くの御指導を頂いた海洋開発工学部安藤定雄部長、大松重雄室長に厚く御礼申し上げます。また、実験に際しては、星野邦弘技官、高井隆三技官、運動性能部石田茂資技官に御助力を頂き、ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 合田 良実:波高計群による方向スペクトルを用いた反射波の推定, 港湾技術研究所報告, 第19巻, 第13号, 1980, pp.37~70
- 2) Barber, N.F.: The directional resolving power of an array of wave detectors, Ocean Wave Spectra, Prentice, Inc., 1961, pp.137~150
- 3) Longuet-Higgins, M.S., D.E.Cartright and N D.Smith:Observation of the directional spectrum of sea waves using the motion of a floating buoy, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1963, pp.111~136
- 4) Borgman, L.E.:Directional spectral model for design use for surface wave, Hyd.Engg.Lab., Univ Calif., Berkeley, HEL 1-12, 1963, p.56
- 5) Capon, J:High-resolution frequency wave number spectrum analysis, Proc.IEEE, Vol.57, 1969, pp.1408~1418
- 6) 磯部 雅彦, 近藤 浩右, 堀川 清治:方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984, pp.173~177
- 7) 橋本 典明, 小舟 浩治:最大エントロピー原理(MEP)を用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, 1985, pp.123~145
- 8) 橋本 典明:ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, 1987, pp.97~125
- 9) 合田 良実, 鈴木 康正:光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折, 回折計算, 港湾技研資料, No.230, 1975, pp.45
- 10) 佐々木 弘, 合田 良実, 小長井 孝:現地観測用波浪演算装置の開発について, 港湾技研資料, No.580, 1987, pp.1~23
- 11) Longuet-Higgins, M. S. :The statistical analysis of random, moving surface, Phil. Trans. Roy. Soc London, Ser. A(966), Vol. 294, 1956, pp. 69-181.