

実海域における波の方向スペクトルについて  
—第2報 POSEIDON号の動揺からの方向波スペクトルの推定—

吉元 博文\*

At-sea Measurement of Directional Wave Spectra  
— 2nd Report Estimation of Directional Wave Spectra from Motions of  
a Floating Offshore Structure 'POSEIDON'—  
By  
Hirofumi Yoshimoto\*

Abstract

The purpose of this paper is to develop a program to estimate the directional wave spectra from motions of a floating offshore structure "POSEIDON". The Extended Maximum Likelihood Method (EMLM) is used for the estimation of the directional wave spectra from records of the motions assuming the assumption of linearity between incident waves and motions. The accuracy of the program is examined by using numerical simulations. And then the directional wave spectra estimated from the motions are compared with the results estimated from an array of wave probes by using full-scale data.

The results are as follows; The principal direction of incident waves estimated from the motions agrees quite well with that from the wave probes array. And the directional distribution function also shows a good agreement with the results estimated from the wave probes array.

---

\* 海洋開発工学部

原稿受付 平成5年9月6日

審査済 平成6年5月25日

## 目次

## 記号表

1. 緒言
  2. 浮体の動揺からの方向波スペクトルの推定方法
    - 2.1 浮体で計測される動揺モード間のクロススペクトルと入射波の方向波スペクトルとの関係
    - 2.2 拡張最尤法による方向波スペクトルの推定
  3. 方向波スペクトルの推定精度に関する検討
    - 3.1 応答関数の計算
    - 3.2 拡張最尤法の推定精度
      - (1) 2種類の動揺モードの組み合わせ
      - (2) 3種類以上の動揺モードの組み合わせ
      - (3) 考察
    - 3.3 応答関数に対する検討
      - (1) 定常変位が方向波スペクトルの推定精度に与える影響
      - (2) 波高影響
      - (3) 考察
  4. 実海域データの解析
    - 4.1 POSEIDONの動揺、風、入射波の計測方法
      - (1) POSEIDONの動揺の計測
      - (2) 風、入射波の計測
    - 4.2 解析データとその解析方法
    - 4.3 波高計アレイからの推定結果との比較
      - (1) 入射波の主方向
      - (2) 方向波スペクトル
        - i) パワースペクトル
        - ii) 方向分布関数
  5. 結言
- 謝辞  
参考文献

## 記号表

$C_d$	: 粘性抗力係数
$f_p$	: $S_{\xi}(f)$ (あるいは入射波) のピーク周波数
$f'_p$	: $S'_{\xi}(f)$ のピーク周波数
$G(x)$	: 光易型方向分布関数
$G(f, x)$	: 方向分布関数
$G'(f, x)$	: 動揺から推定された方向分布関数
$H_m(f, x)$	: 入射波に対する動揺の応答関数
$g$	: 重力加速度
$H_{1/3}$	: 有義波高
$H_w$	: 入射波の両振幅
$h$	: 水深
$L$	: POSEIDONの船長
$m_0$	: $S_{\xi}(f)$ の0次モーメント
$m'_0$	: $S'_{\xi}(f)$ の0次モーメント
$m_{20}$	: $S_{\xi}(f)$ の2次モーメント
$s$	: $G(x)$ の方向集中パラメーター

$S_z(f)$	: Heave方向の加速度のパワースペクトル
$S_{\xi}(f)$	: 入射波のパワースペクトル
$S'_{\xi}(f)$	: $\xi$ から推定された入射波のパワースペクトル
$S_{\xi}(f, x)$	: 入射波の方向波スペクトル
$S'_{\xi}(f, x)$	: 動揺から推定された方向波スペクトル
$T_{H1/3}$	: 有義波周期
$U_m$	: 平均風速
$x_m, y_m$	: 動揺計測点の $x, y$ 座標
$\ddot{x}$	: 甲板中央のSurge方向の加速度
$\ddot{y}$	: 甲板中央のSway方向の加速度
$\ddot{z}$	: 甲板中央のHeave方向の加速度
$\beta$	: (2.12)式を満足させるための係数
$\theta$	: Pitchの片振幅
$\kappa$	: 波数
$\lambda$	: 入射波の波長
$\phi$	: Rollの片振幅
$\phi_{mn}(f)$	: 動揺モード間のクロススペクトル
$\Phi(f)$	: $\phi_{mn}(f)$ より構成されるクロススペクトルマトリックス
$\Phi_{mn}^{-1}(f)$	: $\Phi(f)$ の逆行列 $\Phi^{-1}(f)$ の $m, n$ 成分
$\chi$	: 出合い角
$\chi_0$	: 入射波の主方向
*	: 共役複素数

## 1 緒言

船舶技術研究所では、1986年から1990年にかけて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」を用いた実海域実験を実施した。前報<sup>1)</sup>では、この実海域実験で行った波高計アレイ方式による方向波スペクトルの計測方法を中心に報告したが、本報告はその続報として、POSEIDONの動揺から推定された入射波の方向波スペクトルについて報告する。

さて、方向波スペクトルがもたらす最も重要な情報は入射波の波向きであり、文献<sup>2)</sup>で報告しているように実海域実験が行われた4年間のうち、波高計アレイ方式で波向きを観測できたのはそのうち約2年間に過ぎない。現在、当部では実海域実験データを利用した海洋構造物の設計指針案の作成が検討されているが、POSEIDONの動揺あるいは構造歪等のデータ解析を進めていくうえにおいて、波向きの欠測が大きな障害となっている。そこで、波向きが欠測している期間を補うことを目的として、POSEIDONの動揺データから入射波の波向き、すなわち方向波スペクトルを推定することを検討した。基本的には、POSEIDONの動揺から入射波の方向波スペクトルを推定する方法は、POSEIDONを巨大なbuoyに見立てれば、Heave/Pitch/Roll Buoyなどの観測原理と同等であると考えられる。従って、今回の検討のポイントは、推定手法よりもむしろ、動揺から推定された方向波スペクトルは、どの程度の精度を有するのかという点にあるといえる。

これまで、実海域において船体運動から方向波スペクトルを推定した例は極めて少なく、平山<sup>3)</sup>、井関ら<sup>4)</sup>の研究があげられるにすぎない。平山はピッチと上下加速度、井関らはピッチと船首上下加速度を用いて、拡張最尤法<sup>5)</sup>によって方向波スペクトルを推定している。一般に方向波スペクトルの推定精度は、推定に用いる物理量の組み合わせ、個数と解析方法によって大きく影響を受けるため、推定精度に関する検討が不可欠であるが、両者とも十分な検討を行っていない。そのため、平山、井関らの示す結果が実際にどの程度の精度を有するかは不明である。

こうした点を踏まえ、本報告では動揺から推定される方向波スペクトルの精度を明らかにすることを主眼として、数値シミュレーション、さらに波高計アレイから推定された結果との比較を行い、動揺から推定される方向波スペクトルの推定精度を明らかにする。特に、実海域で海洋構造物の動揺から推定された方向波スペクトルと波高計アレイから推定されたものを直接比較した例は、著者の知る範囲では過去に例がないものである。今後、この比較より得られる知見は、現在のところ船舶の安全運航支援システムで最も得ることが困難な情報とされる波向き情報<sup>6)</sup>の取得に、あるいは大水深域における方向波スペクトルの観測に大きく寄与するものと考えられる。

以下、今回の検討結果について報告する。

## 2 浮体の動揺からの方向波スペクトルの推定方法

ここでは、次の仮定のもとに、浮体で計測された複数の動揺モードの組合せから入射波の方向波スペクトルを推定する方法について述べる。

- 1) 入射波は、互いに独立な正弦波の重ね合わせで表される。
- 2) 浮体の動揺応答は、入射波に対し線形である。

まず、§2.1で、第3章で述べる数値シミュレーションを行うための重要な関係式、すなわち、浮体で計測された動揺モード間のクロススペクトルと入射波の方向波スペクトルとの関係について、次に、§2.2で拡張最尤法による方向波スペクトルの推定法について述べる。

### 2.1 浮体で計測される動揺モード間のクロススペクトルと入射波の方向波スペクトルとの関係

まず、波がない状態で、浮体の重心を通り鉛直上方にz軸をもち、z軸と静水面との交点を原点として、静水面上に直交するx、y軸を持つような右手系の座標系 (Fig.1) を考える。この座標系で観測される入射波 $\zeta(\vec{x}, t)$ は、任意の位置ベクトル $\vec{x}$ における周波数 $f$ と波数ベクトル $\vec{\kappa}$ の成分波の重ね合わせとして、

$$\zeta(\vec{x}, t) = \int_{\vec{\kappa}} \int_f \exp\{-i(\vec{\kappa} \cdot \vec{x} - 2\pi ft)\} Z(d\vec{\kappa}, df) \quad (2.1)$$

と表せるものとする。ここに、 $t$ は時間、 $Z(d\vec{\kappa}, df)$ は、 $\vec{\kappa} \sim \vec{\kappa} + d\vec{\kappa}$ 、 $f \sim f + df$ を代表する複素振幅である。次に、

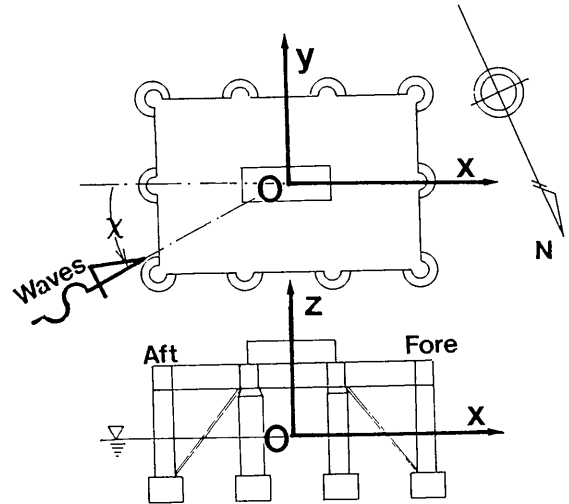


Fig. 1 座標系と出会い角 $\chi$ の定義

入射波の波数周波数スペクトル $S_{\zeta}(\vec{\kappa}, f)$ を

$$S_{\zeta}(\vec{\kappa}, f) d\vec{\kappa} df = \langle Z^*(d\vec{\kappa}, df) Z(d\vec{\kappa}, df) \rangle \quad (2.2)$$

と定義する。ここに、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均、 $*$ は共役複素数を表す。(2.1)式より、浮体上の点 $\vec{x}$ における入射波に対する動揺の応答関数の波数表示を $H(\vec{\kappa}, f)$ とすれば、仮定2)より $\vec{x}$ における入射波に対する浮体の動揺モード $\xi(\vec{x}, t)$ は

$$\xi(\vec{x}, t) = \int_{\vec{\kappa}} \int_f H(\vec{\kappa}, f) \exp\{-i(\vec{\kappa} \cdot \vec{x} - 2\pi ft)\} Z(d\vec{\kappa}, df) \quad (2.3)$$

と表すことができる。 $\vec{x}_m$ と $\vec{x}_n$ で観測された動揺モード $\xi_m$ と $\xi_n$ のクロススペクトル $\phi_{mn}(f)$ を次式のように定義する。

$$\phi_{mn}(f) df = \left\langle \int_{\vec{\kappa}} H_m^*(\vec{\kappa}, f) \exp(i\vec{\kappa} \cdot \vec{x}_m) Z^*(d\vec{\kappa}, df) \times \int_{\vec{\kappa}'} H_n(\vec{\kappa}', f) \exp(-i\vec{\kappa}' \cdot \vec{x}_n) Z(d\vec{\kappa}', df) \right\rangle \quad (2.4)$$

さらに、仮定1)と(2.2)式を考慮し、 $df$ を省略した表記にすれば

$$\phi_{mn}(f) = \int_{\vec{\kappa}} H_m^*(\vec{\kappa}, f) H_n(\vec{\kappa}, f) \exp\{-i\vec{\kappa} \cdot (\vec{x}_m - \vec{x}_n)\} S_{\zeta}(\vec{\kappa}, f) d\vec{\kappa} \quad (2.5)$$

を得る。結果的には、(2.5)式は、磯部ら<sup>5)</sup>によって導かれた波数周波数スペクトルと任意波動量間のクロススペクトルとの関係式と同じである。さらに、波数と周波数の間に次の分散関係式、

$$(2\pi f)^2 = \kappa \cdot g \cdot \tanh(\kappa h), \quad \kappa = |\vec{\kappa}| \quad (2.6)$$

が成立するものとする。ここに、 $g$ は重力加速度、 $h$ は水深である。(2.6)式が成立するとし、 $\vec{x}_m = (x_m, y_m)$ 、 $\vec{\kappa} = (\kappa \cos \chi, \kappa \sin \chi)$ とおけば、(2.5)式は次のクロススペクトルと

入射波の方向波スペクトル $S_s(f, \chi)$ の表記に改めることができる。

$$\phi_{mn}(f) = \int_0^{2\pi} H_m^*(f, \chi) H_n(f, \chi) \times \exp[-i\chi\{(x_n - x_m)\cos\chi + (y_n - y_m)\sin\chi\}] S_s(f, \chi) d\chi \quad (2.7)$$

$$\text{ただし } S_s(f, \chi) = \kappa S_s(\bar{x}, f)$$

ここに、 $H_m(f, \chi)$ は $H_m(\bar{x}, f)$ を周波数表示に改めたものであり、 $\chi$ は出会い角（本報告では、Fig.1に示すように $\chi = 180^\circ$ を正面向波と定義する）である。第3章で述べる方向波スペクトルの推定精度に対する検討は、(2.7)式をもとに行うことになる。

## 2.2 拡張最尤法による方向波スペクトルの推定

原理的には、多数の動揺モード間のクロススペクトルを求めることができれば(2.7)式より入射波の方向波スペクトルを求めることが可能であるが、現実には、限られたモードでしか観測を行うことができないため、少ない情報からいかに精度よく方向波スペクトルを推定するかが問題となる。こうした問題を解決するためにさまざまな方法<sup>9)</sup>が提案されているが、今回の場合、大量のデータのルーチン解析に用いるために、解析法として汎用性があること、少ない情報でも高い方向分解能を得ることができること、計算時間が短いことなどが要求される。そこで、こうした要請を満たす解析手法として、磯部ら<sup>9)</sup>によって開発された拡張最尤法を用いることにする。以下、磯部に従い拡張最尤法について簡単に紹介する。

いま、入射波の波数周波数スペクトルの推定値 $\tilde{S}_s(\bar{x}, f)$ が、 $\phi_{mn}(f)$ の線形結合

$$\tilde{S}_s(\bar{x}, f) = \sum_m \sum_n \alpha_{mn}(\bar{x}) \phi_{mn}(f) \quad (2.8)$$

で表されるとすれば、 $\tilde{S}_s(\bar{x}, f)$ は(2.5)式から

$$\tilde{S}_s(\bar{x}, f) = \int_{\bar{x}'} S_s(\bar{x}', f) w(\bar{x}, \bar{x}') d\bar{x}' \quad (2.9)$$

$$w(\bar{x}, \bar{x}') = \sum_m \sum_n \alpha_{mn}(\bar{x}) H_m^*(\bar{x}', f) H_n(\bar{x}, f) \exp\{-i\bar{x}' \cdot (\bar{x} - \bar{x}')\} \quad (2.10)$$

と表すことができる。ここに、 $\alpha_{mn}(\bar{x})$ は線形結合の係数である。つまり、 $\tilde{S}_s(\bar{x}, f)$ は、 $S_s(\bar{x}', f)$ にウィンドウ $w(\bar{x}, \bar{x}')$ をかけたものであり、問題は最適なウィンドウ設計に置き換えられる。磯部は、最適なウィンドウは、 $\bar{x} = \bar{x}'$ で $w(\bar{x}, \bar{x}') = 1$ 、 $\bar{x} \neq \bar{x}'$ で $w(\bar{x}, \bar{x}') = 0$ 、即ち、 $w(\bar{x}, \bar{x}')$ が限りなくデルタ関数に近い場合であるとして、 $w(\bar{x}, \bar{x}') = 1$ のもとで、 $\tilde{S}_s(\bar{x}, f)$ が最小となる問題を解き、次式を提案している。

$$\tilde{S}_s(f, \chi) = \frac{\beta}{\sum_m \sum_n \Phi_{mn}^{-1}(f) H_m(f, \chi) H_n^*(f, \chi) \exp[-i\chi\{(x_m - x_n)\cos\chi + (y_m - y_n)\sin\chi\}]} \quad (2.11)$$

(116)

(2.11)式が拡張最尤法と呼ばれるものであり、(2.11)式の $\Phi_{mn}^{-1}(f)$ は $\phi_{mn}(f)$ で構成されるクロススペクトルマトリックス $\Phi(f)$ の逆行列 $\Phi^{-1}(f)$ のm、n成分を表す。また、 $\beta$ は次の関係を満足させるための係数である。

$$\int_0^{2\pi} S_s(f, \chi) d\chi = \int_0^{2\pi} S_s(f) G(f, \chi) d\chi = S_s(f) \left( \int_0^{2\pi} G(f, \chi) d\chi = 1 \right) \quad (2.12)$$

ここに、 $S_s(f)$ は入射波のパワースペクトル、 $G(f, \chi)$ は方向分布関数を表す。

## 3 方向波スペクトルの推定精度に関する検討

ここでは、拡張最尤法の推定精度についてPOSEIDONを例にとって具体的に検討する。そのためには入射波に対するPOSEIDONの動揺の応答関数が必要であるので、まず、§3.1で動揺の応答関数の計算方法について述べ、次に、§3.2で、求められた応答関数をもとに拡張最尤法の推定精度について調べる。さらに、§3.3で、応答関数が方向波スペクトルの推定精度に与える影響について検討する。

### 3.1 応答関数の計算方法

POSEIDONの主要目をTable-1に示す。POSEIDONの応答関数は、次の一般的な係留浮体の運動方程式<sup>9)</sup>を解くことによって求めている。

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + m_{jk}) \ddot{X}_k + N_{jk} \dot{X}_k + N_{jk} (\dot{X}_k - \bar{U}_k) | \dot{X}_k - \bar{U}_k | + C_j(X_1, X_2, \dots, X_6) + G_j(X_1, X_2, \dots, X_6)] = F_{j,j} \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (3.1)$$

$X_j$ は浮体重心の各方向変位で、 $j=1, 2, \dots, 6$ の順にSurge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yawの各運動に対応している。 $M_{jk}$ は浮体の質量、 $m_{jk}$ は付加質量、 $N_{jk}$ は造波減衰係数、 $C_j$ は静的流体圧力により生じる復原力、 $G_j$ は浮体に変化するとき生じる係留反力である。また、 $\bar{U}_k$ はk方向の水粒子速度の平均値、 $F_{j,j}$ は波浪外力である。

計算に際し、流体力は3次元特異点分布法（パネル分割数780個）によって求めた。さらに、(3.1)式の浮体と水粒子との相対速度の2乗に比例する粘性減衰力の項は、文献<sup>9)</sup>に従い、次のように等価線形化して計算を行った。

$$N_{j,k} (\dot{X}_k - \bar{U}_k) | \dot{X}_k - \bar{U}_k | \cong \frac{8}{3\pi} C_d K_{jk} \bar{V} (\dot{X}_k - \bar{U}_k) \quad (3.2)$$

ただし  $N_{j,k} = C_d K_{jk}$ 、 $\bar{V} = | \dot{X}_k - \bar{U}_k |$   
ここに、 $C_d$ は抗力係数（ここでは、文献10)に基づきコラムの軸の方向 $C_d=2.0$ 、軸に垂直方向 $C_d=1.0$ としている）、 $K_{jk}$ は物体形状に依存する係数で、例えば、POSEIDONのコラムのような円柱の場合には、 $K_{jk} = \frac{1}{2} \rho g \pi d \frac{d^2}{4}$  ( $d$ は円柱の直径、 $\rho$ は流体の密度、 $g$ は重力加速度)で表される。計算の際には、(3.2)式の右辺の第一項は粘性減衰力、

Table-1 POSEIDONの主要目

Items	Dimensions
Length overall	34.0 m
Breadth overall	24.0 m
Height of main structure	13.5 m
Draft	5.5 m
Distance between columns	10.0 m
Column diameter	2.0 m (partially 2.5m)
Column height	8.5 m
Footing diameter	4.0 m
Footing height	2.5 m
Displacement	530.805 ton
Metacentric height Transverse	1.891 m
Longitudinal	5.297 m
Radius of Gyration Roll	9.808 m
Pitch	12.859 m

第二項は波浪外力として取り扱われる。

Fig.2は、応答関数の計算例であり、入射波の波高 $H_w = 6$  mとした時の甲板中央におけるSurge、Sway、Heave方向の加速度並びにRoll、Pitch、Yawの応答関数を出会い角 $\chi$ と周波数 $f$ について示してある。応答関数の推定精度に関してはすでに文献11) で報告してあり、結果を示すにとどめる。

### 3.2 拡張最尤法の推定精度

ここでは、§3.1で求めた応答関数を用いて、拡張最尤法の推定精度について数値シミュレーションによって検討を行う。数値シミュレーションは、(2.7)式と(2.11)式をもとに行った。すなわち、(2.7)式にある分布形状を持った方向波スペクトルを入力として与えて、クロススペクトルマトリックス $\Phi$ を作成する。この $\Phi$ から(2.11)式を用いて、入力された方向波スペクトルを推定する方法である。計算では、入力する方向波スペクトルとして、次の光易型方向分布関数<sup>12)</sup>を与えている。

$$G(\chi) = G_m \cos^{2S} \left( \frac{\chi - \chi_0}{2} \right) \quad (3.3)$$

ここに、 $G_m$ は(2.12)式の関係満足させるための定数、 $S$ は方向集中パラメーター、 $\chi_0$ は入射波の主方向を表す。ここでは、 $S = 10$ 、 $\chi_0 = 210^\circ$ として計算を行った。この $S$ の値は、これまで観測成果<sup>7)</sup>に基づき、実験海域の風波の

平均的な値として与えたものである。以下、結果を示す。

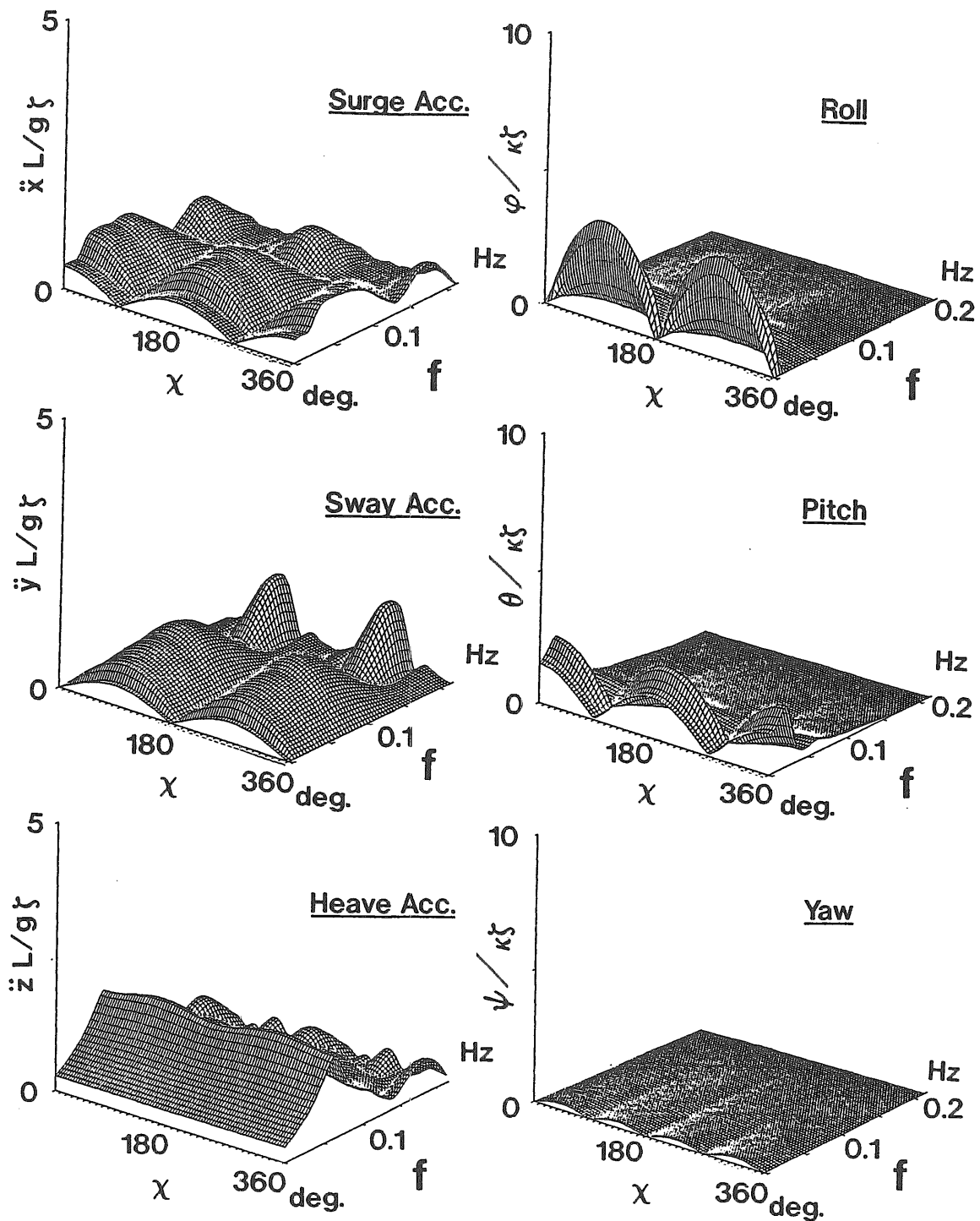
#### (1) 2種類の動揺モードの組み合わせ

方向波スペクトルを推定するのに最小の構成である。まず、平山<sup>3)</sup>、井関ら<sup>4)</sup>と同じ縦運動のみの組み合わせであるPitchとHeave方向の加速度の組み合わせについて計算を行った。結果をFig.3に示す。図から、入力した入射波の主方向とは別にもう一つのピークが現れているのがわかる。この理由として、平山、井関らは、縦運動のみの組み合わせのため左舷側と右舷側を区別できなかったとしているが、Fig.4に示すようにSurge方向とSway方向の加速度の組み合わせの場合も、ピークの位置は異なるが入射波の主方向とは別なピークが出現し、左舷側と右舷側の区別がつかないことがわかる。この理由について検討してみる。

今、POSEIDONの甲板中央の動揺の応答関数を、入射波に対する位相差を $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ として $H_1(\chi) \exp(i\epsilon_1)$ 、 $H_2(\chi) \exp(i\epsilon_2)$ と表し、簡単のために入力として $\chi_0$ の方向から振幅1の規則波が入射してきた場合について考えてみる。(2.7)式からクロススペクトルマトリックス $\Phi$ を求めれば

$$\begin{vmatrix} H_1(\chi_0)^2 + \delta & H_1(\chi_0)H_2(\chi_0) \exp\{i(-\epsilon_1 + \epsilon_2)\} \\ H_1(\chi_0)H_2(\chi_0) \exp\{i(\epsilon_1 - \epsilon_2)\} & H_2(\chi_0)^2 + \delta \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

となる。ここに $\delta$ は、観測値に含まれるノイズを表しており、合田<sup>13)</sup>が指摘しているように、拡張最尤法の場合、 $\delta$



### Acc. ; Acceleration

Fig. 2 甲板中央の各動揺モードの応答関数の計算結果(波高 $H_w = 6$  m)

の項がなければクロススペクトルマトリックス $\Phi$ はSingularとなり逆行列を計算することができないために、便宜的に付加するものである。(2.11)式から2種類の動揺モードの組み合わせの方向波スペクトル $S_{\zeta}^*(f, \chi)$ は

$$S_{\zeta}^*(f, \chi) = \frac{\delta\{H_1(\chi_0)^2 + H_2(\chi_0)^2\} + \delta}{\{H_1(\chi)H_2(\chi_0) - H_1(\chi_0)H_2(\chi)\}^2 + \delta\{H_1(\chi)^2 + H_2(\chi)^2\}} \quad (3.5)$$

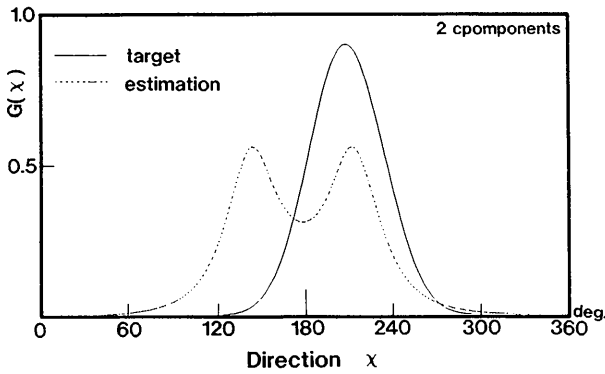
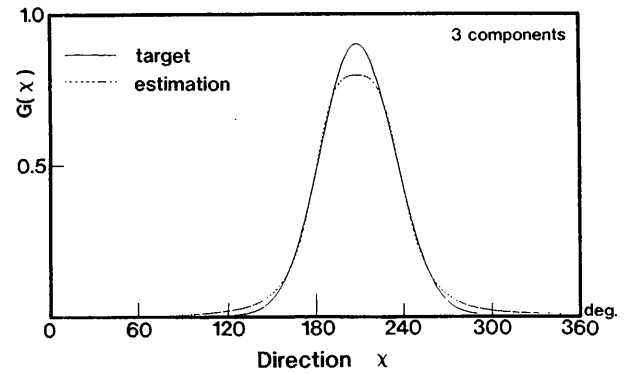


Fig. 3 方向分布関数の推定精度、2種類の動揺モード (Heave方向の加速度とPitch)



(a) Surge、Sway、Heave方向の加速度

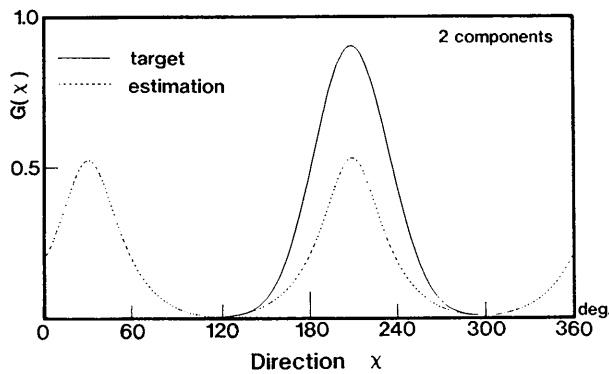
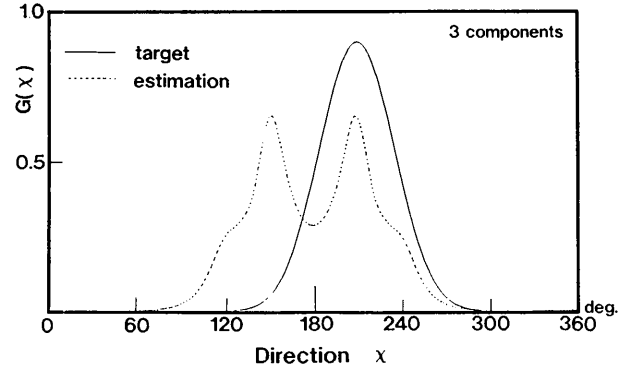


Fig. 4 方向分布関数の推定精度、2種類の動揺モード (Surge方向とSway方向の加速度)



(b) Surge、Heave方向の加速度とPitch

Fig. 5 方向分布関数の推定精度、3種類の動揺モード

となる。(3.5)式において、 $\delta^2$ の項を微小として無視すれば、(3.5)式が最大となるのは、 $H_1(x)H_2(x_0) = H_1(x_0) \cdot H_2(x)$ の場合であることがわかる。 $H_1(x)$ 、 $H_2(x)$ を次のようにおけば、

- Heave方向の加速度： $H_1(x) = 1$
- Pitch： $H_2(x) = \cos x$
- Surge方向の加速度： $H_1(x) = \cos x$
- Sway方向の加速度： $H_2(x) = \sin x$

Heave方向の加速度とPitchの組み合わせの場合は $x_0$ と $2\pi - x_0$ 、Surge方向とSway方向の加速度の組み合わせの場合は $x_0$ と $x_0 + \pi$ でピークをとることがわかる。すなわち、2種類の動揺モードの組み合わせの場合、入射波の推定できる範囲は限られてしまうことになる。

### (2) 3種類以上の動揺モードの組み合わせ

3種類の動揺モードの組み合わせの場合、縦運動のみのような組み合わせなどをのぞき、全出会い角に対し推定可能となる。代表的な例として、Surge、Sway、Heave方向の加速度の組み合わせ、Surge、Heave方向の加速度とPitchの組み合わせの結果を、Fig.5 (a)、(b)に示す。Fig.5(a)から、Surge、Sway、Heave方向の加速度の組み合わせは、ピーク付近での推定精度が若干低下するものの、ほぼ入力値を再現できていることがわかる。これに対し、

Fig.5(b)から、Surge、Heave方向の加速度とPitchの組み合わせは、応答関数が右舷と左舷で対称であるために、左舷側と右舷側で対称の結果となるが、推定された結果は2種類の動揺モードの組み合わせ (Fig.3、4) に比べ、かなり歪んだ形状となっていることがわかる。船首、甲板中央、船尾のHeave方向の加速度の組み合わせを用いた場合でもFig.5(b)と同様の傾向を示す。従って、こうした組み合わせは避ける必要がある。

Fig.6、Fig.7に動揺モード4種類、6種類の組み合わせについて検討した結果を示す。当然のことながら、用いる動揺モードの個数が増えるにつれて入力値をよく再現できるようになる。ここでは代表的な例のみを示したが、他の動揺モードの組み合わせをとっても大差はない。ただし、この場合においても、3種類の動揺モードの組み合わせの場合と同じ理由により、縦運動だけの様な組み合わせを避ける必要がある。

### (3) 考察

以上のことを、実海域データに適用する観点からまとめれば次のようになる。

全出会い角に対し入射波を検出するためには、3種類以上の動揺モードが必要である。推定に用いる動揺モードの

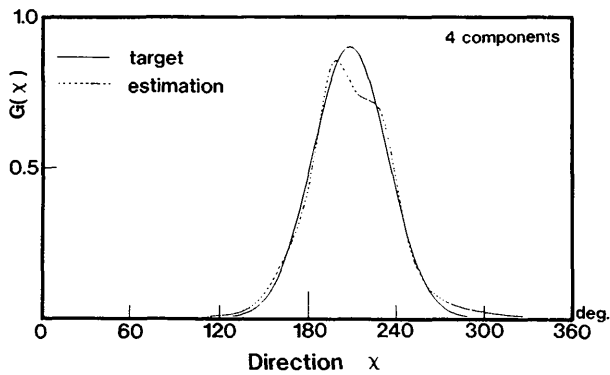


Fig. 6 方向分布関数の推定精度、4種類の動揺モード (Surge、Sway、Heave方向の加速度とYaw)

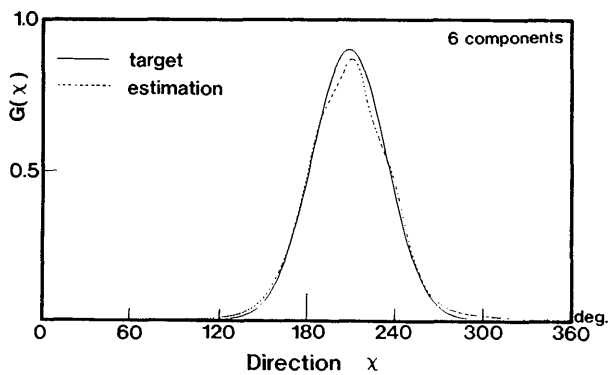


Fig. 7 方向分布関数の推定精度、6種類の動揺モード (Surge、Sway、Heave方向の加速度とRoll、Pitch、Yaw)

個数が多ければ方向波スペクトルの推定精度は高くなるが、3種類の動揺モードの組み合わせでも実用上十分な精度で推定できる。動揺モードの組み合わせの相違による推定精度には大差がないが、組み合わせに関しては注意する必要があり、縦運動だけの様な組み合わせは、推定できる入射波の出会い角が限られること、また、推定精度が低下する場合もあり避ける必要がある。

3.3 応答関数に対する検討

§3.2では、Fig.8に示す係留ラインの展張状態での応答関数を用いて検討を行ってきたが、実際にはPOSEIDONは弛緩係留されているために、風あるいは流れの影響を受けて、これらの定常外力と係留反力が釣り合う位置まで移動した(以下、定常変位と称す)後の平衡点の回りで周期応答をすることになる。従って、定常変位をした場合としない場合とでは、係留ラインによる復原力が変わるために応答関数が異なる。実際の解析では、応答関数をデータベース化しそれを利用して解析を行うことになるが、定常変位の影響までを考慮してデータベース化するのは難しい。そこで、定常変位による影響について数値シミュレーションによって検討し、定常変位を考慮する必要性の有無につ

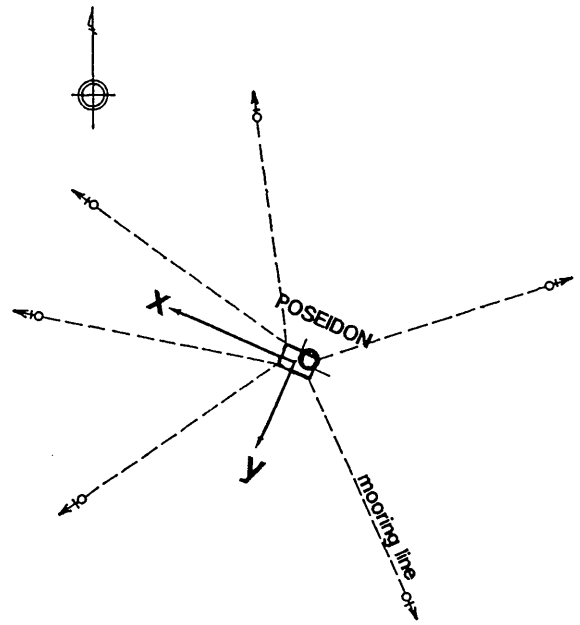


Fig. 8 係留ラインの展張状態

いて調べてみる。また、文献14)で既に報告されているように、POSEIDONはHeaveの同調点付近で波高レベルに対する応答の変化が顕著であり(以下、波高影響と称す)、この点についても検討しておく必要がある。

- (1) 定常変位が方向波スペクトルの推定精度に与える影響
- Fig.9は、各定時計測中のPOSEIDONの平均的な位置、すなわち定常変位量を平均風速 $U_m$ のクラス別に示したも

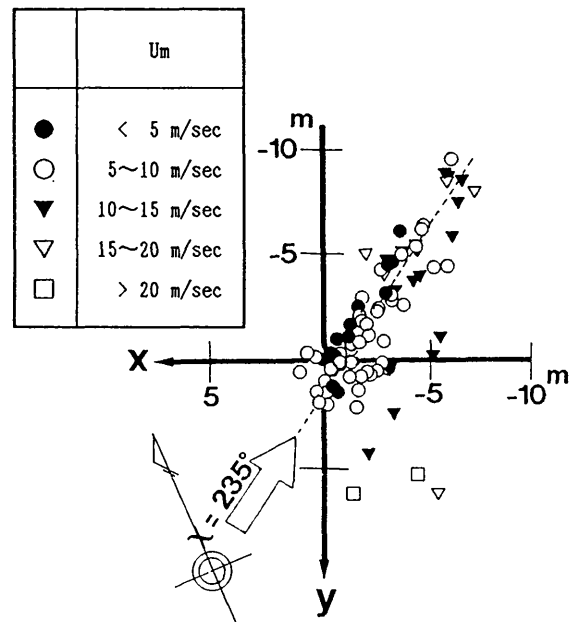


Fig. 9 各定時計測におけるPOSEIDONの定常変位量



のであるが、図から、ほぼ $\chi=235$ 度のライン上を移動していることがわかる。これは、実験海域では $\chi=235$ 度方向からの流れが卓越しているために起こっている現象であり<sup>15)</sup>、最大で $x$ 軸の負の方向に約5m、 $y$ 軸の負の方向に約10m程度移動していることがわかる。

そこで、Fig.8に示すPOSEIDONの初期状態から $x$ 軸の負の方向に5m、 $y$ 軸の負の方向に10m初期変位を与えることより、定常変位を模擬した状態でPOSEIDONの応答関数を計算した。なお、この計算では定常変位に伴う

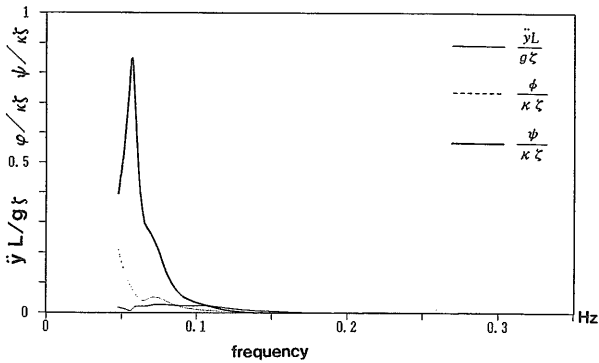


Fig.10 定常変位させた状態で求めた横運動の応答関数 ( $\chi=180^\circ$ )

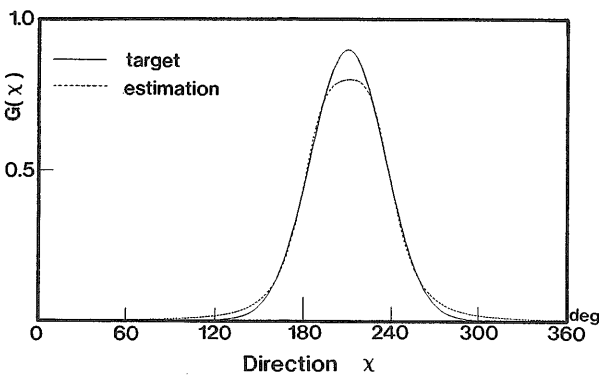


Fig.11 定常変位が推定精度に与える影響、3種類の動揺モード (Surge、Sway、Heave方向の加速度)

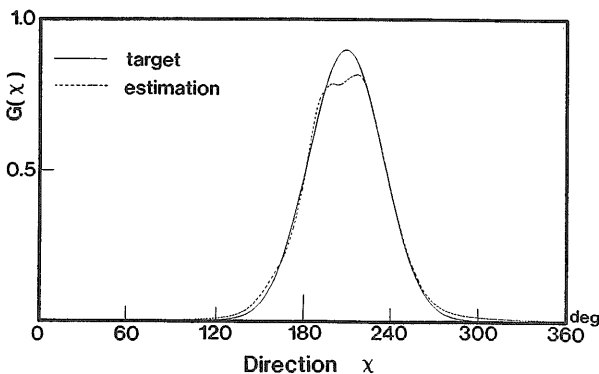


Fig.12 定常変位が推定精度に与える影響、6種類の動揺モード (Surge、Sway、Heave方向の加速度とRoll、Pitch、Yaw)

POSEIDONの姿勢角の変化は考慮していない。一例として、正面向波中 ( $\chi=180^\circ$ ) での横運動 (Sway方向の加速度、Roll、Yawの応答関数) の計算結果をFig.10に示す。図より、正面向波中であるにもかかわらず、定常変位がある場合には、係留ラインの復原力が左右非対称となるために、わずかながら横運動を生じるようになることがわかる。

次に、この応答関数を用いて方向波スペクトルの推定精度に与える影響について検討してみる。検討方法は§3.2と同じく(2.7)式と(2.11)式を用いて行うが、(2.7)式でクロススペクトルを計算する際に定常変位を与えた状態の応答関数を用い、(2.11)式では定常変位のない状態での応答関数を用いている。代表的な結果をFig.11、Fig.12に示す。図より、定常変位のない場合の結果であるFig.5、Fig.7に比べて、ピーク位置での形状が若干変化しているが大差はなく、推定精度に及ぼす定常変位の影響は小さいといえる。従って、実際の解析では定常変位の影響は考慮しない。

## (2) 波高影響

理論計算における応答関数の波高影響は、(3.2)式によって与えられる。波高影響の一例をFig.13に示す。図は、正面向波中での甲板中央のHeave方向の加速度の応答関数の計算結果を示したものであり、入射波の波高を1m、3m、6m、8mと変化させたものである。図より、同調点付近での波高影響が顕著であることがわかる。

まず、こうした波高影響による応答関数の差がどのような影響を及ぼすかについて、定常変位の場合と同様な手法、すなわち、(2.7)式に波高8mの応答関数を用い、(2.11)式では波高1mの応答関数を用いることによって検討した。結果は、定常変位の場合と同様、ピーク付近での推定精度がやや低下するほかは大差はなかった。従って、波高影響が方向分布関数の推定精度に与える影響は小さいといえるが、実際の解析では、Heave方向の加速度を入射波のパワースペクトルを推定する際に用いているために、波高影響がパワースペクトルに与える影響は無視できない。入射波

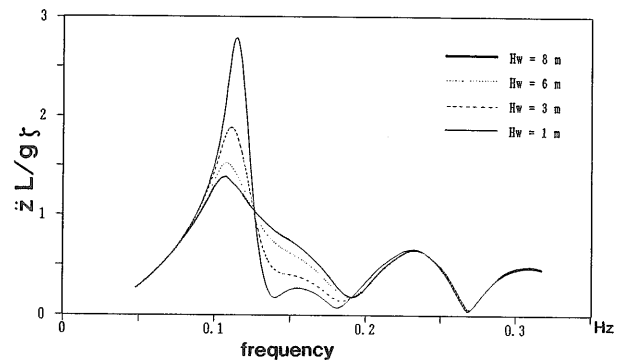


Fig.13 正面向波中での甲板中央のHeave方向の加速度の応答関数

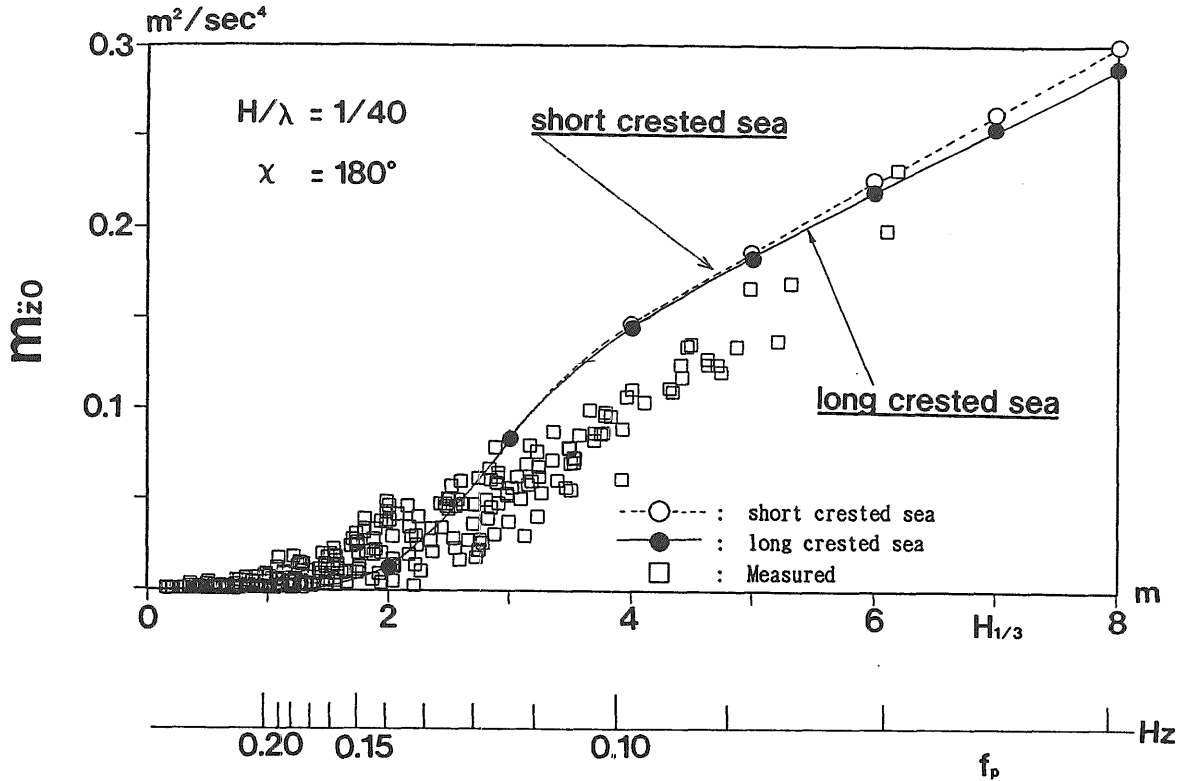


Fig.14 甲板中央のHeave方向の加速度スペクトルの0次モーメント $m_{z0}$ と有義波高 $H_{1/3}$ との相関

のパワースペクトルの推定にHeave方向の加速度を使用している理由であるが、Fig.2からわかるように、Heave方向の加速度の応答関数は、出会い角に対する応答の変動が小さいこと、入射波が有為なパワーを有する周波数帯に同調点をもつなどの理由による。実際の解析では、(2.7)式において入射波の主方向を $\chi_0$ としたときに、 $H_m(f, \chi) \approx H_m(f, \chi_0)$ として

$$\phi_{mn}(f) = |H_m(f, \chi_0)|^2 \int_0^{2\pi} S_s(f, \chi) d\chi = |H_m(f, \chi_0)|^2 S_s(f) \quad (3.6)$$

より入射波のパワースペクトルを推定し、(2.11)式の係数 $\beta$ を決定している。

そこで、波高影響を考慮する方法について考えてみる。Fig.14は、甲板中央のHeave方向の加速度のスペクトルの0次モーメント $m_{z0}$ と有義波高 $H_{1/3}$ との相関を示したものであり、データは'89年11月～'90年2月の定時計測で収録されたものである。図から、 $m_{z0}$ と $H_{1/3}$ には強い相関があり、 $m_{z0}$ から海象状態をある程度予測できることがわかる。データから経験式を導く方法もあるが、図からわかるように波高の高いときのデータが少ないため、理論計算による予測値を用いることにした。

Fig.14に示す●と○は理論計算による予測値であり、●は(3.7)式で与えられるModified JONSWAPスペクトル $S_{mj}(f)$ <sup>16)</sup>を(3.6)式に入力して計算した結果、すなわち、方向分散性を無視したものである。これに対し、○は方向分散性を考慮したものであり、Modified JON-

SWAPスペクトルと光易型方向分布関数から構成される方向波スペクトルを(2.7)式に入力して計算した結果である。計算では、これまでの解析結果に基づいて $\chi_0 = 180^\circ$ 、波の粗度( $H_{1/3}/\lambda$ ,  $\lambda$ は波長、 $\lambda = g/2\pi f_p^2$ )の平均的な値として1/40、光易型方向分布関数の方向集中パラメータ $s$ として(3.8)式<sup>16)</sup>を与えている。

$$S_{mj}(f) = 0.140 (H_{1/3}/f_p) (f/f_p)^{-1} \exp\{-2/3(f/f_p)^{-6}\} \cdot 2 \exp\{-(f_p - f)^2 / (2\sigma^2 f_p^2)\} \\ \sigma = 0.07 (f \leq f_p), \sigma = 0.09 (f > f_p) \quad (3.7)$$

$$s = S_{mj} / [1 + 10 \{ \log_e(f/f_p) \}^2], \quad S_{max} = 2.2 H_{1/3}, \quad (3.8)$$

ここに、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $f_p$ はピーク周波数である。図より、(3.6)式より計算された予測値は、方向分散性を考慮した場合に比べ、有義波高8mにおいて約3%程度小さくなっていることがわかる。実際のデータの計測精度等を考慮すれば実用上無視し得るオーダーであり、(3.6)式を用いても問題はないことがこの結果からも明かであろう。また、予測値は有義波高4m付近でやや過大となっているが、解析を行う上での影響は小さいとの判断から、図に示す予測値を用いた。実際の解析の際には、予測値○を多項式で近似して、有義波高を $m_{z0}$ の関数として与えている。これにより、Heave方向の加速度の0次モーメントから有義波高を推定することができ、海象状態に応じた応答関数を用いることが可能となる。

(3) 考察

以上のことを、まとめれば次のようになろう。  
 定常変位あるいは応答関数の波高影響が、方向波スペクトルの推定精度に与える影響は無視できる。しかしながら、実際の解析では甲板中央のHeave方向の加速度を入射波のパワースペクトルの推定に使用しているために、§3.3(2)で述べた方法によって、海象状態に応じた応答関数を用いることにする。

4 実海域データの解析

ここでは、以上の考察をもとに、実海域データを用いてPOSEIDONの動揺から入射波の方向波スペクトルを推定してみる。まず、§4.1でPOSEIDONの動揺、風、入射波の計測方法について簡単に触れ、§4.2で解析に用いたデータとその解析方法、§4.3で波高計アレイから推定した結果と動揺から推定した結果の比較を示す。

4.1 POSEIDONの動揺、風、入射波の計測方法

POSEIDONの動揺、風、入射波の計測方法については、すでに詳細な報告<sup>2)</sup>がなされており、ここでは、その概要を簡単に紹介する。

(1) POSEIDONの動揺の計測

実海域実験では、POSEIDONの動揺として、Fig.15に示すように、甲板中央でSurge、Sway、Heave方向の加速度並びにRoll、Pitch、Yawを、船首尾でHeave方向の加速度を計測している。加速度の計測には、サーボ式加速度計を、Roll、Pitchの計測にはVertical Gyroを、Yawの計測にはDirectional Gyroを用いている。このうち、加速度は傾斜による影響を受けているので、解析の際は、SurgeとSwayについて次の補正を行っている。なお、Heaveに関しては、傾斜の影響は小さいとして補正は行っていない。

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{x}_a \cos \theta + (\ddot{z}_a + g) \sin \theta \\ \ddot{y} &= \ddot{y}_a \cos \phi - (\ddot{z}_a + g) \sin \phi \\ \ddot{z} &= \ddot{z}_a \end{aligned} \tag{4.1}$$

ここに、 $\ddot{x}$ 、 $\ddot{y}$ 、 $\ddot{z}$ は傾斜の影響を除いた甲板中央のSurge、Sway、Heave方向の加速度、 $\ddot{x}_a$ 、 $\ddot{y}_a$ 、 $\ddot{z}_a$ は計測されたSurge、Sway、Heave方向の加速度、 $g$ は重力加速度、 $\phi$ はRoll角、 $\theta$ はPitch角を表す。

(2) 風、入射波の計測

風は、POSEIDONの測風塔に超音波式3軸風速計を設置して計測を行っている。計測位置は海面上19.5mの位置である (Fig.15参照)。入射波の計測は、POSEIDONの船首側約180mの海底に、3台の超音波式波高計を直線アレイとなるように設置して行った。波高計の設置状況をFig.16に示すが、Fig.16に示す波高計の配置状況は、前報<sup>1)</sup>で報告したものと若干異なっている。これは前報の報告後に行った水中測定の測量結果を採用したためであり、水中測量

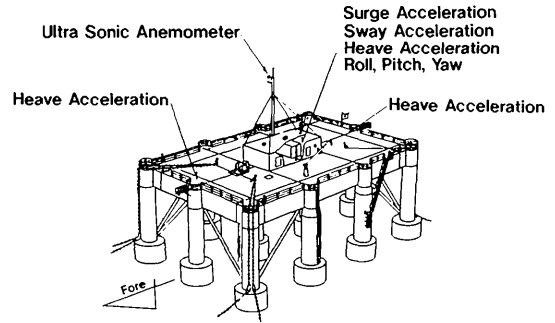


Fig.15 POSEIDONの動揺データの計測箇所

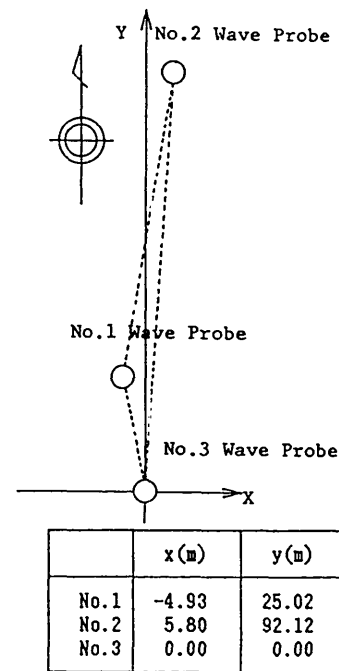


Fig.16 波高計アレイの配置状況

後は、本実海域実験での方向波スペクトルの解析では、全てFig.16に示す値を用いている。

4.2 解析データとその解析方法

(1) 解析データ

解析の対象としたのは、1989年11月19日に収録された連続観測データであり、発達した低気圧の接近に伴い実験海域において風波が急激に発達した際に、約47時間連続収録 (サンプリング間隔1秒) したものである。解析は、この連続観測データを2048個のデータに分割し計82ケースについて行った。Fig.17は、分割したデータを統計解析した結果であり、平均風速 $U_m$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{H1/3}$ の経時変化を示している。図に示す波の統計量は3台の波高計の平均値であり、風波の最盛期には有義波高6.9mを記録している。なお、有義波高、有義波周期の経時変化を表す細線と点線が一部途切れているが、これは、その区間

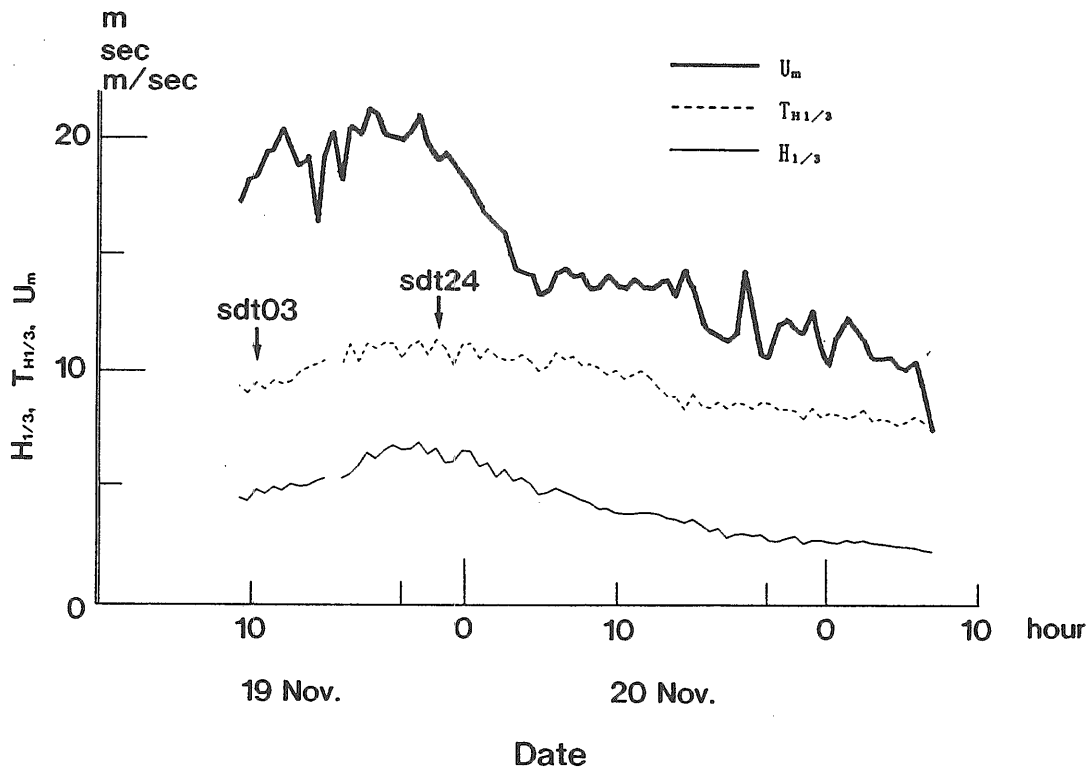


Fig. 17 解析に用いた連続観測データの平均風速  $U_m$ 、有義波高  $H_{1/3}$ 、有義波周期  $T_{H_{1/3}}$  の経時変化。図中の sdt03 と sdt24 は、Fig. 19 で使用したデータの名称であり、それぞれ経時変化の中での相当する時点を表している。

データに多数のノイズが混入しており、不良データとして省いたことによる。

## (2) 解析方法

解析は、分割したデータについてトレンド除去の前処理を行った後、2048個のデータを512個ごとの4つの部分に分割して行っている。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、クロススペクトルは、4つの部分の平均値を求め、Hamming Window<sup>13)</sup>によって周波数の平滑化を行っている。次に、Heave方向の加速度のパワースペクトルから0次モーメントを求めた後、§3.3で述べた方法により海象状態を推定し、海象に応じた応答関数を決定する。応答関数は、あらかじめ、周波数0.05Hz～0.32Hz、出会い角 $10^\circ$  おきに $0 \sim 360^\circ$  の範囲で、波高1 m、3 m、6 m、8 mについて計算してデータベース化してある。今回作成した解析プログラムでは、このデータベースを読み込み、周波数、出会い角と波高についてLagrange補間でなめらかに内挿することによって、任意の周波数、出会い角と波高について応答関数を求めることができるようになってきている。なお、比較として示す波高計アレイの解析は、最尤法（拡張最尤法 (2.11) 式で  $H(f, x) = 1$  としたものが最尤法とよばれる）によって行っている<sup>14)</sup>。

さて、一番問題となるのが、どの動揺モードを解析に用いるかである。Fig. 15に示すように今回の場合は最大8

種類の動揺モードを用いることが可能である。しかしながら、理論計算との対応が良くない動揺モードがあり<sup>15)</sup>、Roll、Pitch、Yawと船尾のHeave方向の加速度が理論計算との対応が悪いことがわかっている。故に、Surge、SwayとHeave方向の加速度と船首のHeave方向の加速度を用いることにした。

## 4.3 動揺から推定された結果と波高計アレイから推定された結果との比較

ここでは、4種類の動揺モード（Surge、Sway、Heave方向の加速度と船首のHeave方向の加速度）から推定された結果と波高計アレイから推定された結果との比較を示す。

### (1) 入射波の主方向

Fig. 18は、4種類の動揺モードと波高計アレイから推定された入射波の主方向と風向の経時変化を示したものである。図に示す主方向は、推定された入射波のパワースペクトルのピーク周波数に光易型方向分布関数 (3.3) 式をあてはめて、主方向  $\alpha_0$  を最小自乗法によって推定したものである。以下、これを入射波の主方向と定義する。図より、動揺から推定された入射波の主方向は、波高計アレイから推定された主方向と極めてよく一致していることがわかる。また、別報<sup>16)</sup>で、この実験海域では波が浅水影響により屈折するために、風向きと主方向は必ずしも一致しないことを報告したが、動揺から推定された結果もこれを裏付けて

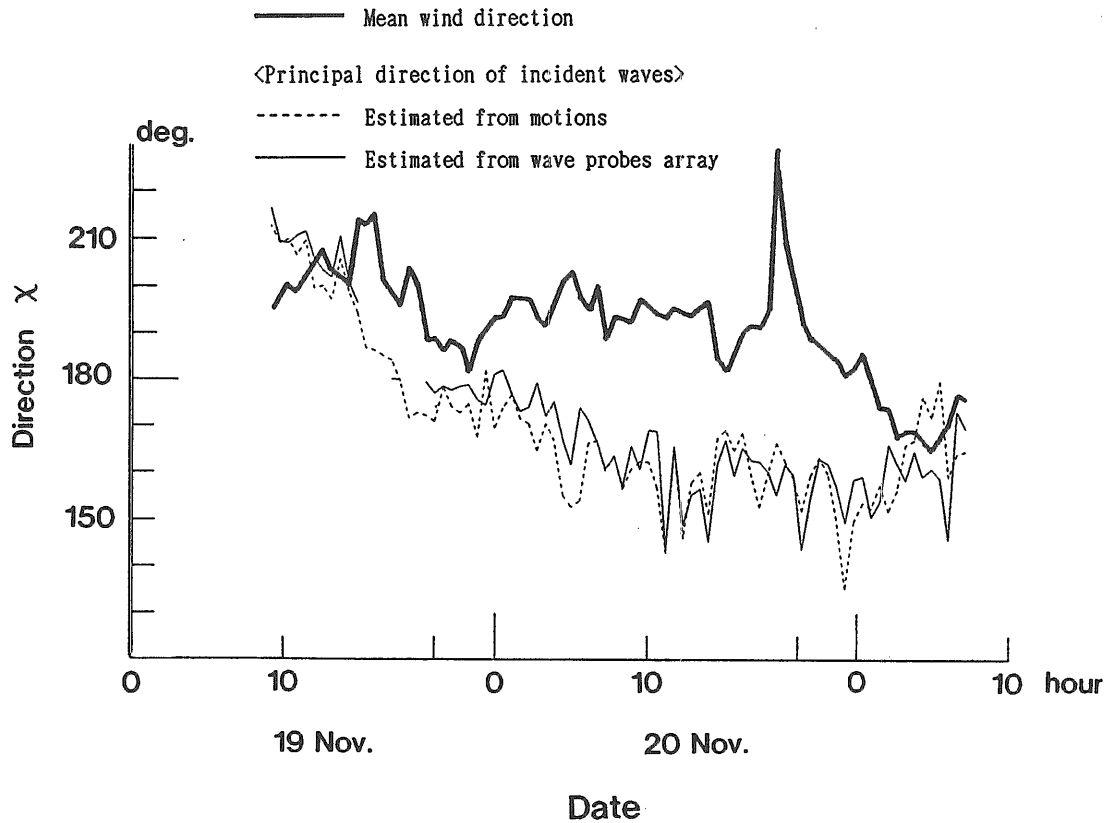


Fig. 18 動揺並びに波高計アレイから推定された入射波の主方向と風向の比較

おり、興味深い結果を与えている。

次に、方向波スペクトルの形状と方向分散性について検討してみる。

(2) 方向波スペクトル

Fig. 19(1)、(2)は動揺並びに波高計アレイから推定した方向波スペクトルを鳥瞰図と等高線図の形で示したものであり、合わせて、当時の海象状況をTable-2に示す。Fig. 19では、動揺から推定する場合は、出会い角 $0^\circ \sim 360^\circ$ で推定可能であるが、波高計アレイとの対比の都合上 $90^\circ \sim 270^\circ$ の出会い角について表示している。図中のr91119/sdt03とr91119/sdt24は解析したデータを識別するためにつけたものであり、以下、それぞれsdt03、sdt24と称す。Fig. 17中のsdt03、sdt24もこれに従う。図より、動揺から推定された方向波スペクトルは、波高計アレイから推定された結果に比べて方向分散性が大きく、波高が低くなるにつれてその差が大きくなる傾向が伺える。そこで、こうした差を定量的に把握してみることにする。

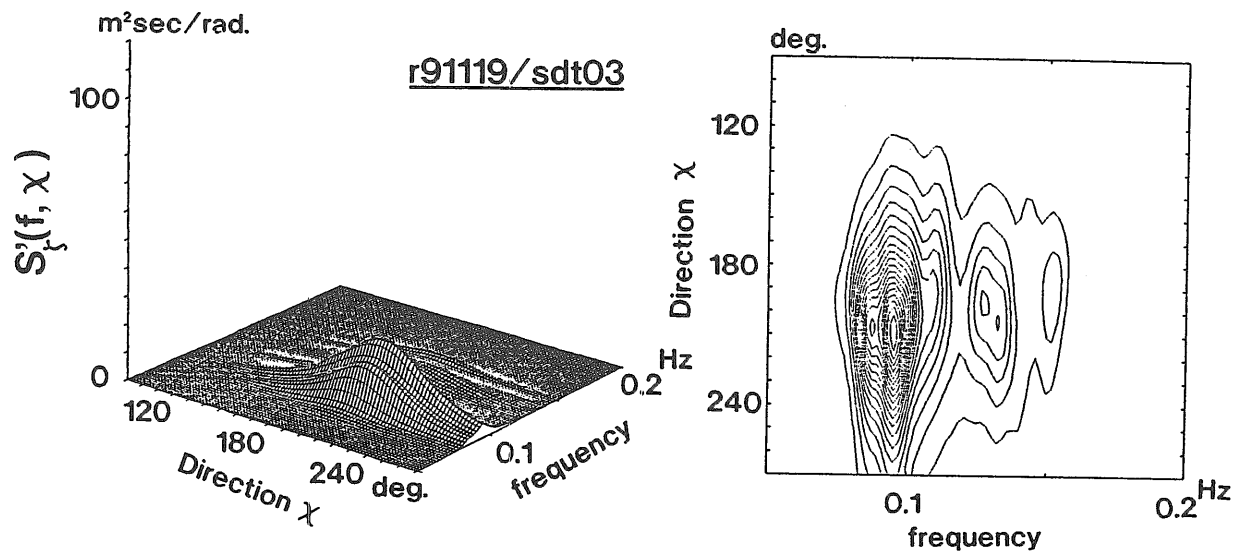
i) パワースペクトル

まず、パワースペクトルに関する定量的な差を調べてみる。Fig. 20はHeave方向の加速度から推定した入射波の0次モーメント $m'_0$ と波高計アレイから推定した $m_0$ を比較した結果であり、Fig. 21はピーク周波数について比較を

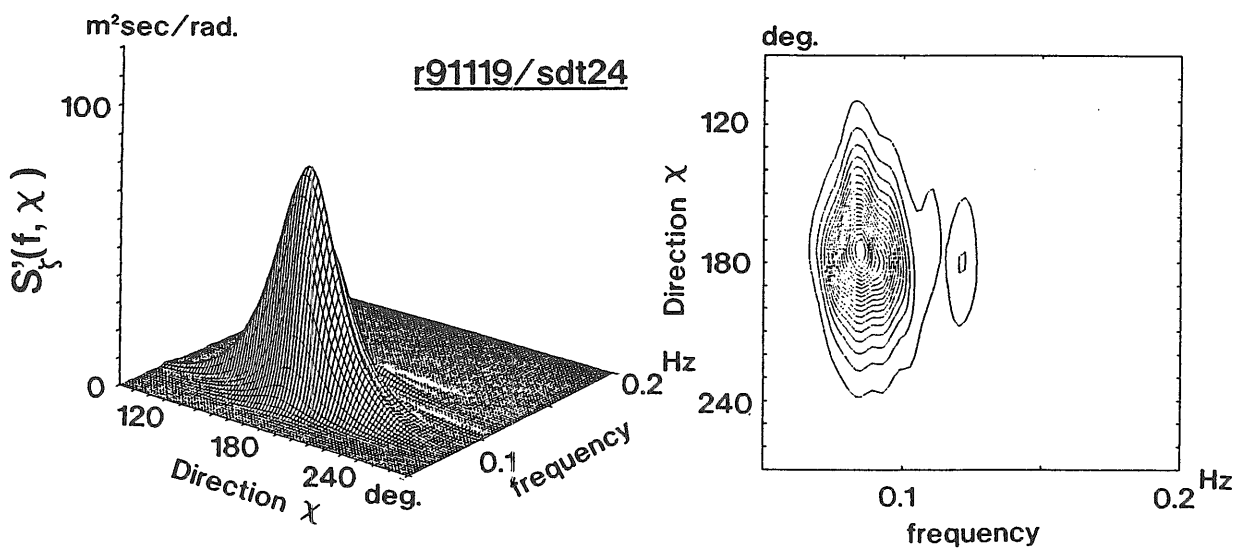
行った結果である。図から、ピーク周波数はほぼ一致しているといえるが、0次モーメントについてはHeave方向の加速度から推定した結果は、波高計から求めた結果に比べ約40%ほど小さくなっていることがわかる。以下、この理由について考察してみる。

Fig. 22は、Fig. 19に示した動揺並びに波高計アレイから推定した方向波スペクトルをパワースペクトル $S'_z(f)$ 、 $S_z(f)$ の形で示したものである。図より、 $S'_z(f)$ と $S_z(f)$ の間には定量的な差があり、この差がFig. 20に示した0次モーメントの差につながっていることがわかる。こうした $S'_z(f)$ と $S_z(f)$ の差は、理論計算によって求めた応答関数に起因している。この点について少し言及してみる。

Fig. 23は、sdt24について、理論計算による応答関数から推定したHeave方向の加速度のスペクトル $S_z(f)$ と実測された $S'_z(f)$ の比較を示したものであり、両者の比較を行うことによって、間接的にはあるが、理論計算によって求めた応答関数の精度評価を行うことができる。なお、応答関数から推定した $S_z(f)$ は、(2.7)式に波高計アレイから求めた方向波スペクトルを与えることによって求めた。図からわかるように、応答関数から推定した $S_z(f)$ は、0.1 Hz $\sim$ 0.12 Hzにかけて、明らかに実測値に対し過大なパワーを与えており、理論計算によって求めた応答関数に定量的な問題があることが示唆されている。従って、 $S'_z(f)$ の推定に(3.6)式を用いていることを考え合わせれば、Fig



(a)sdt03



(b)sdt24

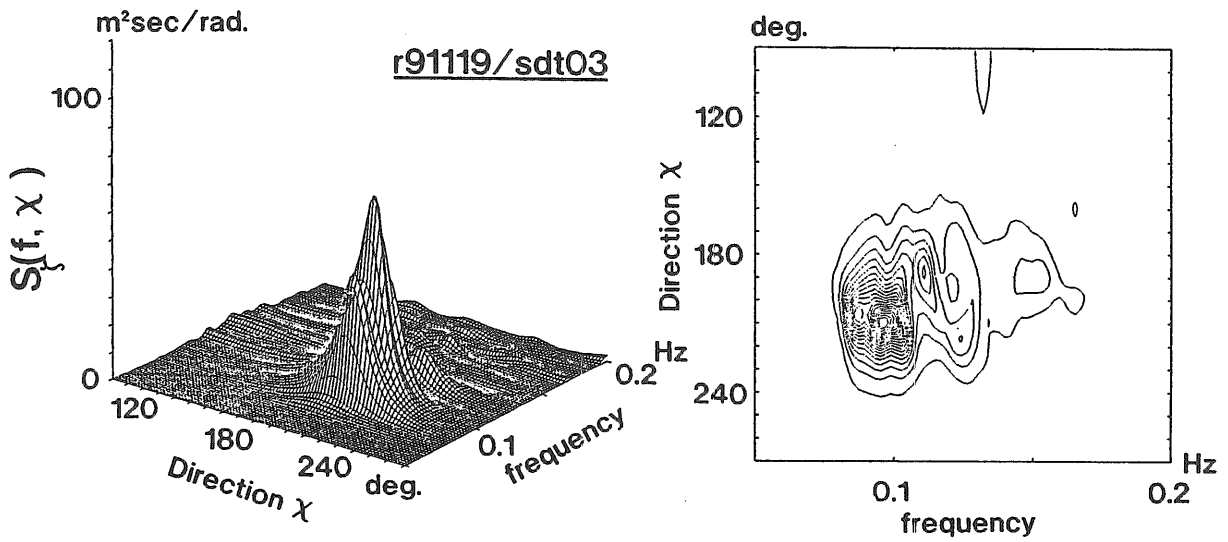
Fig.19(1) 動揺から推定された方向波スペクトル

.22の $S_{\xi}^2(f)$ と $S_{\xi}(f)$ の定量的な差は、理論計算によって求めた応答関数の精度に起因しているといえる。理論計算上の問題点としては、POSEIDONのHeaveの同調点が0.11 Hz付近であることから、§3.1で述べた粘性減衰力の項の評価手法をあげることができよう。今後、応答関数の精度

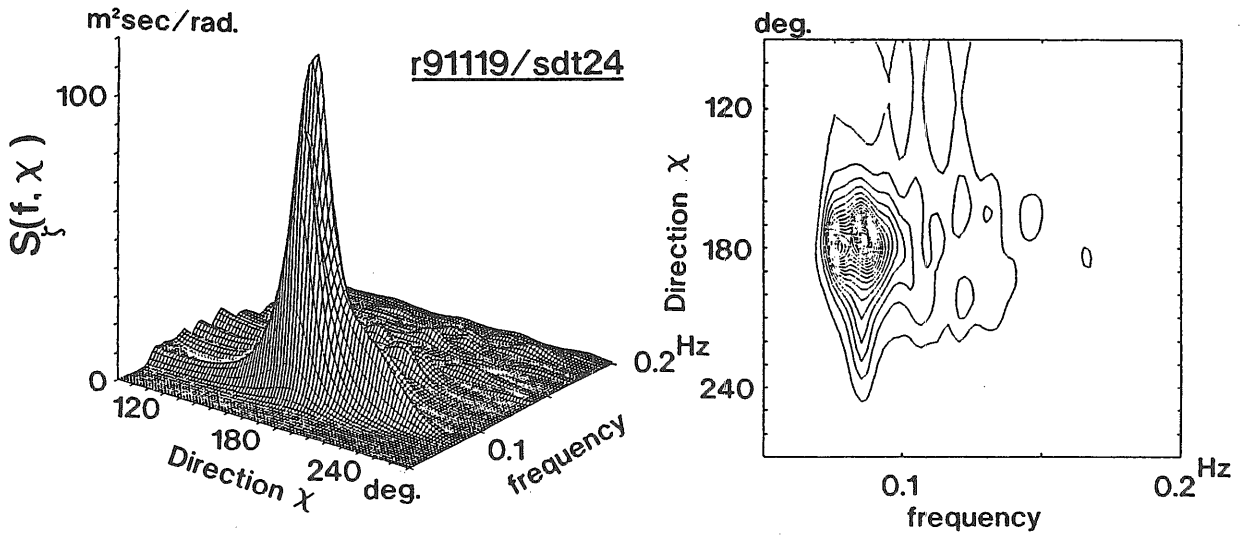
を向上させるために、粘性減衰力の評価手法を検討する必要がある。

## ii) 方向分布関数

Fig.24は、代表的な例として、Fig.19に示した方向波



(a)sdt03



(b)sdt24

Fig.19(2) 波高計アレイから推定された方向波スペクトル

スペクトルのピーク周波数の方向分布関数を示したものである。図より、動揺から推定された結果  $G'(f, \chi)$  は、波高が高いsdt24のケースは波高計アレイの結果  $G(f, \chi)$  とよく一致しているといえるが、波高の低いsdt03のケースでは波高計アレイに比べて、方向分散性の大きな結果を与

えていることがわかる。これは、波高の高い方が有効な計測精度を得やすいといったような動揺データの計測精度を反映した結果と考えられる。Fig.25はこれを定量的に示したものであり、図は、主方向  $\chi_0$  と同様に光易型方向分布関数 (3.3) 式をあてはめて推定した方向集中パラメータ

Table-2 sdt03とsdt24の海象状況

Items	sdt03	sdt24
<u>Wind</u>		
Mean wind speed	19.4 m/sec	19.1 m/sec
Mean Wind direction	199 deg.	181 deg.
<u>Waves</u>		
Principal direction	212 deg.	178 deg.
Significant wave height	4.7 m	6.7 m
Significant wave period	9.1 sec	11.3 sec

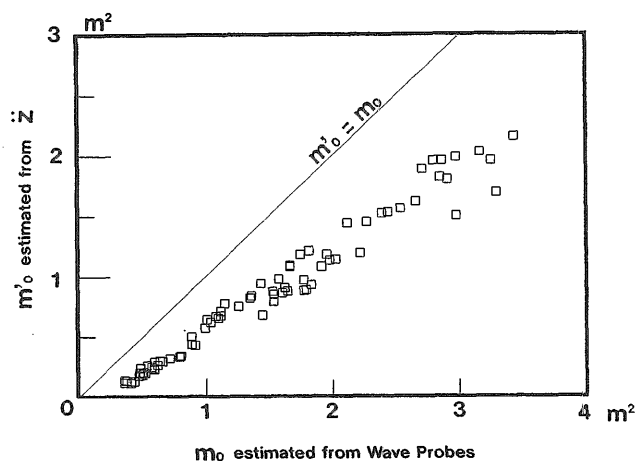


Fig. 20 甲板中央のHeave 方向の加速度から推定された入射波の0次モーメント $m'_0$ と波高計で計測された $m_0$ の比較

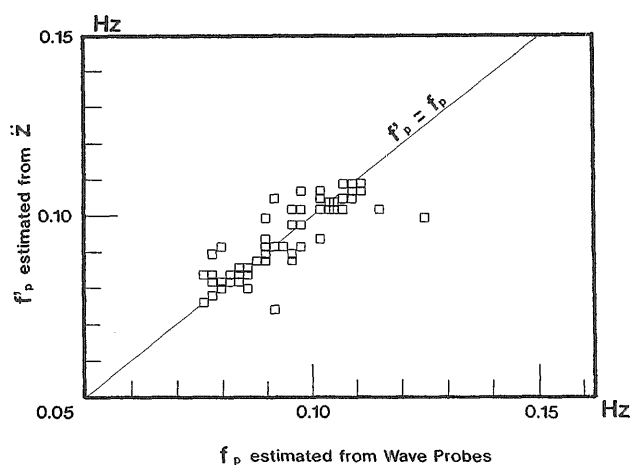
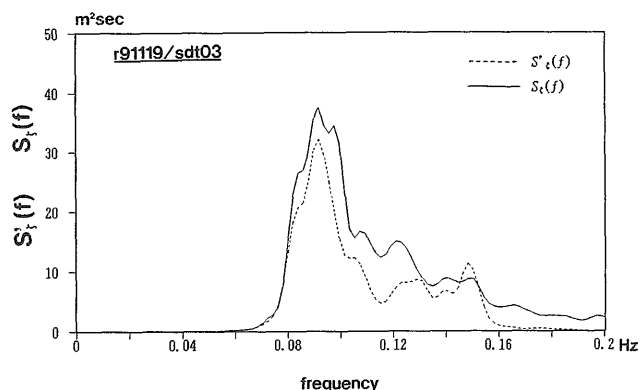
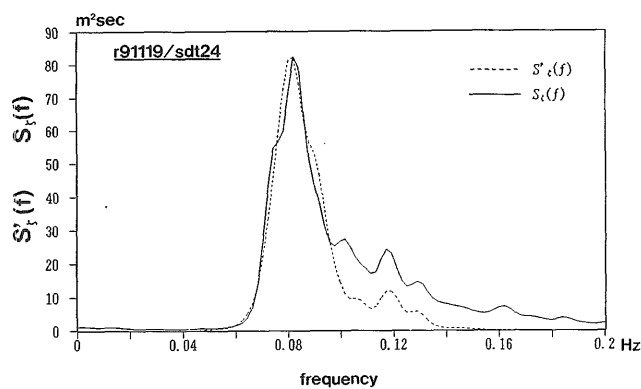


Fig. 21 甲板中央のHeave 方向の加速度から推定された入射波のピーク周波数 $f'_p$ と波高計で計測された $f_p$ の比較



(a)sdt03



(b)sdt24

Fig. 22 甲板中央のHeave 方向の加速度から推定された入射波のパワースペクトル $S'_i(f)$ と波高計で計測された $S_i(f)$ の比較



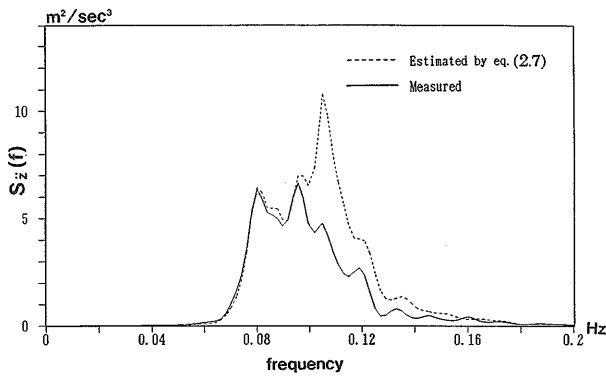


Fig. 23 甲板中央のHeave方向の加速度 $S_z(f)$ の推定値と実測値の比較

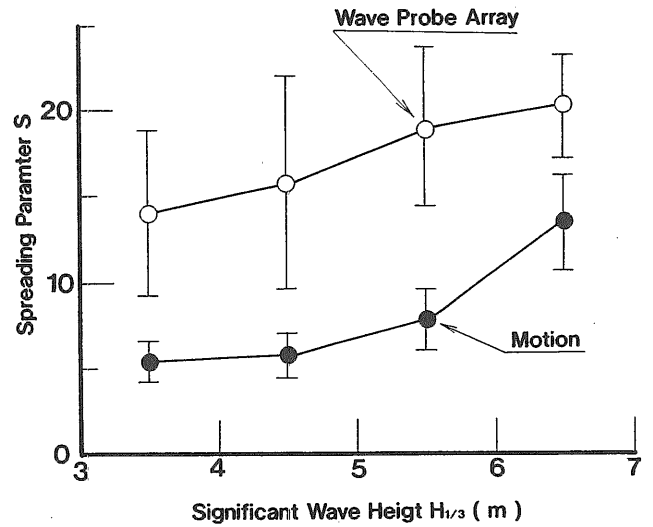


Fig. 25 動揺から推定された方向集中パラメータ $s$ と波高計アレイから推定された結果の比較

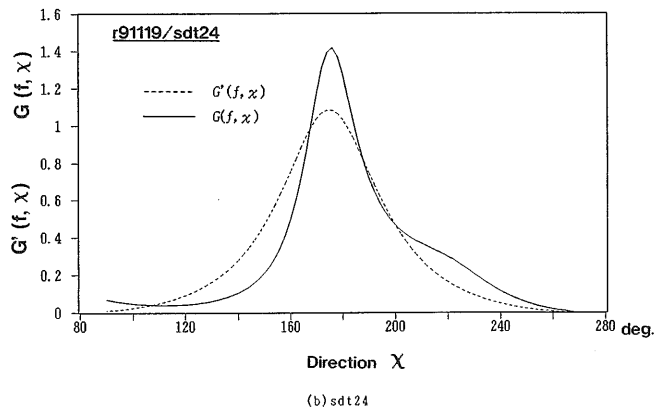
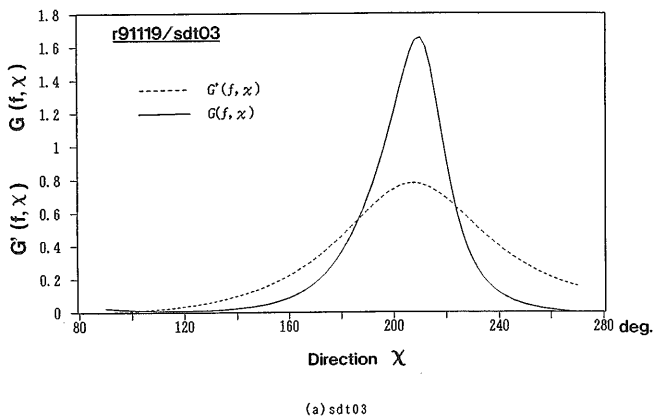


Fig. 24 動揺から推定された方向分布関数 $G'(f, X)$ と波高計アレイから推定された方向分布関数 $G(f, X)$ と比較

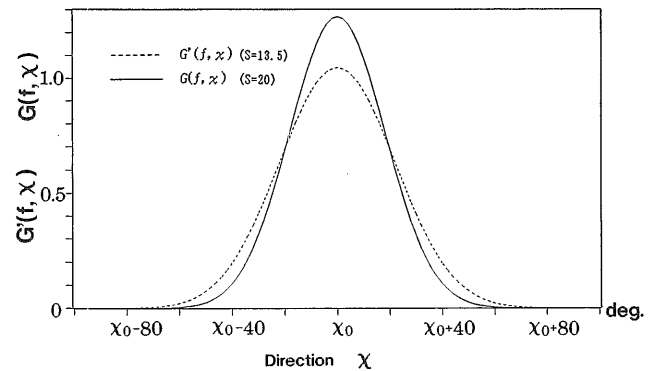


Fig. 26 有義波高6mクラス ( $H_{1/3} = 6m \sim$ ) での方向分布関数の平均的形状の比較

( $H_{1/3} = 6m \sim$ ) での平均値の差は、Fig. 26に示すように、方向分布関数の形状を見る限りにおいてはさほど大きくはない。図より、有義波高6m以上の大波高時には、動揺から推定された方向分布関数は十分な精度を有しているといえよう。なお、Fig. 26に示す方向分布関数は、(3.3)式に有義波高6mクラス ( $H_{1/3} = 6m \sim$ ) の方向集中パラメータ $s$ の平均値20 (波高計アレイ)、13.5 (動揺) を与えたものである。

### 5 結言

以上、POSEIDONの動揺応答から入射波の方向波スペクトルを求める方法として拡張最尤法を採用し、その推定精度について、数値シミュレーション、波高計アレイとの比較を行った結果、次の事項が明らかになった。

- 1) 動揺より、全出合い角に対し入射波を検出するために

$s$ を、有義波高のクラス別 ( $H_{1/3} = 3m \sim 4m, 4m \sim 5m, 5m \sim 6m, 6m \sim$ ) に $s$ の平均値と標準偏差の形で示している。この図からも、動揺から推定された方向波スペクトルは、波高計アレイから推定された結果に比べて方向分散性が大きく、波高が低くなるにつれてその差が大きくなることがみてとれる。しかしながら、有義波高6mクラス

は、3種類以上の動揺モードが必要である。用いる動揺モードの個数が多ければ方向波スペクトルの推定精度は高くなるが、3種類の動揺モードでも推定は可能である。また、いずれの動揺モードの組み合わせをとっても、その推定精度には大差はないが、縦運動だけのような組み合わせは、推定できる入射波の出会い角が限られるだけでなく、推定精度も低下する場合があります避ける必要がある。

2) 動揺から推定した入射波の主方向は、波高計アレイから推定した結果と実用上十分な精度で一致している。

3) 方向分布関数に関しては、波高が6m以上では、動揺から推定された方向分布関数は波高計アレイから推定された結果とよく一致している。しかし、波高が低くなるにつれて、動揺から推定された結果は波高計アレイに比べ方向分散性の大きい結果を与えるようになる。

4) POSEIDONの場合、パワースペクトルに関しては、動揺から推定した結果は入射波のパワーを過小評価する傾向にある。これは、粘性減衰力の評価に起因するものであり、今後の検討が必要である。一方、ピーク周波数の推定に関しては波高計アレイから推定した結果とよく一致している。

5) POSEIDONは弛緩係留されているために、風や流れによって定常変位を起こすが、こうした定常変位が方向波スペクトルの推定精度に与える影響は小さく無視できるものである。

以上、今回開発した方向波解析プログラムは、入射波のパワーの算定にやや問題があるものの、入射波の主方向の検出は十分な精度で行えることがわかった。さらに、工学上問題となるような大波高時では、十分な精度で方向分布関数の推定が可能であることも確認できた。今後、この研究の成果である方向波解析プログラムは実海域データの解析に用いる予定である。

本報告で使用したデータは、運輸技術研究開発調査費による「海洋構造物の沖合い展開のための開発研究」の一環として、海洋技術センターを始め、日本海事協会、民間企業8社との共同研究として実施された浮遊式海洋構造物「POSEIDON」号による実海域実験で取得されたものであることを付記する。

#### 謝辞

本報告書をまとめるにあたり、海洋開発工学部井上令作部長、大松重雄室長には、終始暖かい励ましを頂き厚く御礼申し上げます。さらに、運動性能部渡辺巖室長には、文献、解析全般にわたり、いろいろなご討論をいただき深く

感謝いたします。また、POSEIDONの流体力計算には、当部加藤俊司主任研究官所有の流体力計算プログラム「3DHY」を使用させて頂いた。ここに感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 吉元博文：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－、船舶技術研究所報告、第26巻5号、pp.101-120、1989
- 2) 井上令作他：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その1 実験の概要、船舶技術研究所報告、別冊第13号、1992
- 3) 平山次清：航走中の船体運動による海洋波の推定（その2）－方向スペクトルの推定－、関西造船協会誌、第198号、pp.17-29、1985
- 4) 井関俊夫他：船体運動データからの方向波スペクトルの推定について、日本航海学会論文集、第86号、pp.179-188、1991
- 5) 磯部雅彦他：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、pp.173-177、1984
- 6) 谷澤克治他：船載型安全運航支援システムの実船実験、日本造船学会論文集、第162号、pp.398-407、1987
- 7) 吉元博文他：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その3 実験海域の波方向スペクトルについて、日本造船学会論文集、pp.255-262、1990
- 8) 高石敬史、吉元博文他：海洋波の方向波スペクトルについて、日本造船学会誌、第740号、pp.32-51、1991
- 9) 元良誠三監修：船体と海洋構造物の運動学、成山堂、pp.123-174、1982
- 10) 大松重雄他：模型実験と実海域実験との相関について、平成元年（第54回）船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.169-173、1989
- 11) 大松重雄他：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その4 方向スペクトル波中における動揺応答、日本造船学会論文集、第169号、pp.187-193、1991
- 12) 合田良美：港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説、鹿島出版会、pp.21-24、1977
- 13) 合田良美：波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討、港湾技術研究所報告、第19巻、第3号、pp.37-69、1980
- 14) 大川豊他：実験構造物の運動性能、昭和62年（第50回）船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.115-119、1987
- 15) 大川豊他：実験構造物の長周期運動について、平成元年（第54回）船舶技術研究所研究発表会講演集、pp.165-168、1989
- 16) Yoshimoto, H. et al.: Characteristics of Directional Wave Spectra Measured at Japan Sea, 1992, OMAE, Volume I-A, pp. 35-42, 1992
- 17) 日野幹雄：スペクトル解析、朝倉書店、pp.167-171、1977