

沿岸波浪観測システムに関する研究

Ⅱ. 方向スペクトルの定時観測

徳田正幸・渡部 勲・堀江賢次*・佐藤 浩**

国立防災科学技術センター平塚支所

Observation System for Coastal Waves II. Directional Wave Spectrum Observation

By

M. Tokuda, I. Watabe,

Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention

9-2, Nijigahama, Hiratsuka, Kanagawa-ken, 254

K. Horie and H. Sato

Sagami Institute of Technology

1-1-25, Tsujido Nishikaigan, Fujisawa, Kanagawa-ken, 251

Abstract

In part I of this series (Watabe and Tokuda, 1984), an observation system for wave height of coastal waves had been developed. The system had consisted mainly of single wave-gauge, telemeter and computer.

We expanded the system to multiple wave height observations using three wave-gauges, and succeeded in measuring the directional spectrum for coastal waves. Statistical estimation of wave direction was made on basis of Barber's method. It was indicated from the results that the effective range of wave directional spectrum is the main frequency range from 0.09 Hz to 0.25 Hz.

1. はじめに

最近沿岸域の利用がさらに高まり、従来の波浪の波高情報だけでは不満足なもので、波の方向特性の情報についても必要となって来た。

本論文は三本の波高計センサによる沿岸波浪の方向特性の定時観測システムの開発を試み

* 相模工大. 現在の所属: アジアコンピュータ株式会社

** 相模工大. 現在の所属: 新潟市立曾野木中学校

たものである。第一にデータ採取と処理システム、第二に理論的な背景となる Barber 法 (1963)、第三に開発されたシステムを用いて理想的な単一周期の波による思考実験、第四に平塚沖の波浪等観測塔での観測実例4ケースと処理結果について議論した。

この論文のシリーズの Part I で、すでに一本の波高計センサによる定時波高観測システムを示した(渡部・徳田, 1984)。本研究はこのシステムを発展させて、2次元のスペクトルを求める手法を開発することにある。開発された観測システムは、平塚沖の沿岸でもっとも卓越する 0.09 Hz ~ 0.25 Hz の波浪の方向特性を計測するのにきわめて有効であることが示されたので、ここに報告する。

2. 観測方法及び伝送システム

Part I で議論した波高観測は、一本の波高計センサによるものであった。本論では波浪の方向スペクトルを観測するために、相異なる三点の観測点を用いることにする。よって今までの波高計のセンサの他に、さらに二本のセンサによる波高観測が必要となる。これらの波高計のセンサの設置法は、Part I 及び徳田(1983)に詳しく示されている。用いた三本のセンサの配置図は図1及び表1に示した。この図において、センサ③はPart I の波高計

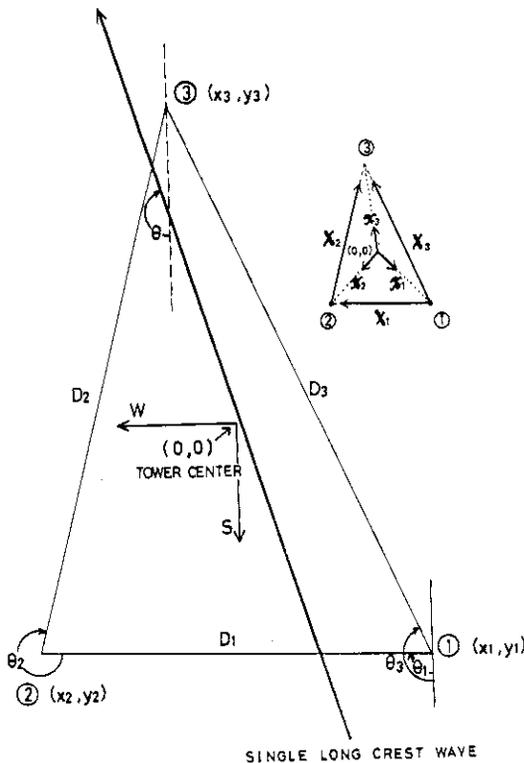


図1 波高計センサの配置図 南に対して $\theta = 0$ で時計回りとする。
 $D_i = (X_i^2 + Y_i^2)^{1/2}$, $\theta_i = \tan^{-1}(X_i/Y_i)$, $i = 1, 2, 3$

Fig. 1 Arrangement of three wave detectors at the Marine Tower

表1 波高計センサの座標(単位メートル)

Table 1 Arrangement of three wave detectors. The unit of size is meter.

i	x_i	y_i	X_i	Y_i	D_i	θ_i
1	-6.57	6.84	$x_2 - x_1 = 13.45$	$y_2 - y_1 = -0.34$	13.45	91.45
2	6.88	6.50	$x_3 - x_2 = -4.99$	$y_3 - y_2 = -15.98$	16.74	197.34
3	1.89	-9.48	$x_3 - x_1 = 8.46$	$y_3 - y_1 = -16.32$	18.38	152.60

センサを用いた。

観測塔で得られた三本の波高計センサのデータは、Part Iと同様に海底ケーブルを通じて陸上の計算機(汎用入出力装置)に伝送される。Part Iと異なる点はセンサ①と②のデータ伝送が加わったことである。これらのデータは別の回線(アナログ送受信装置)によって伝送を行うことにした(Part Iの図5)、これらの三つのチャンネルのデータ伝送の概略は図2に示した。

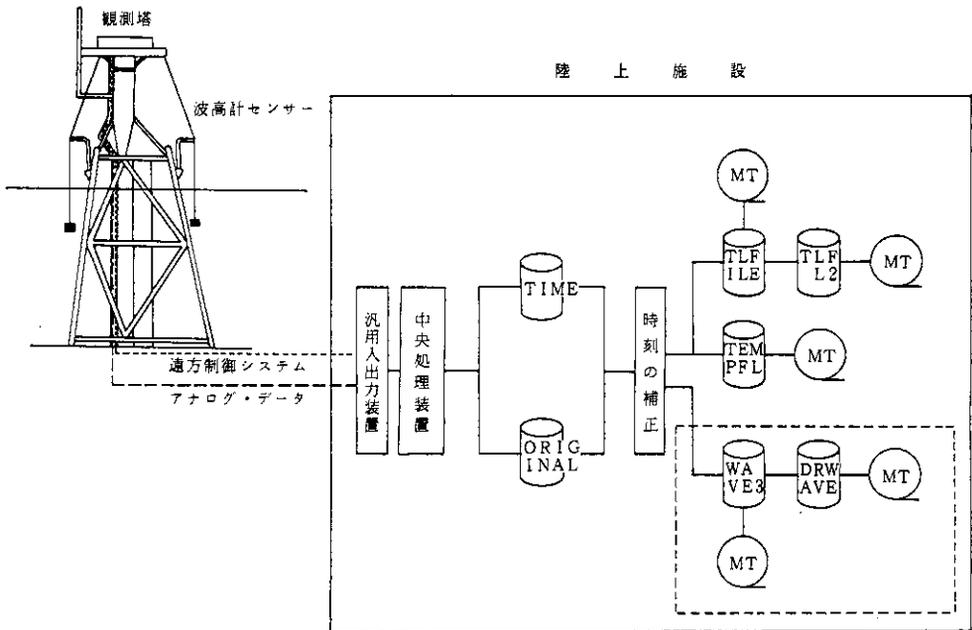


図2 方向スペクトル処理システム 点線で囲まれた部分が方向スペクトル処理システムのために開発されたもの。

Fig. 2 Block diagram of total system of data gathering for the wave height and directional wave spectrum of coastal waves

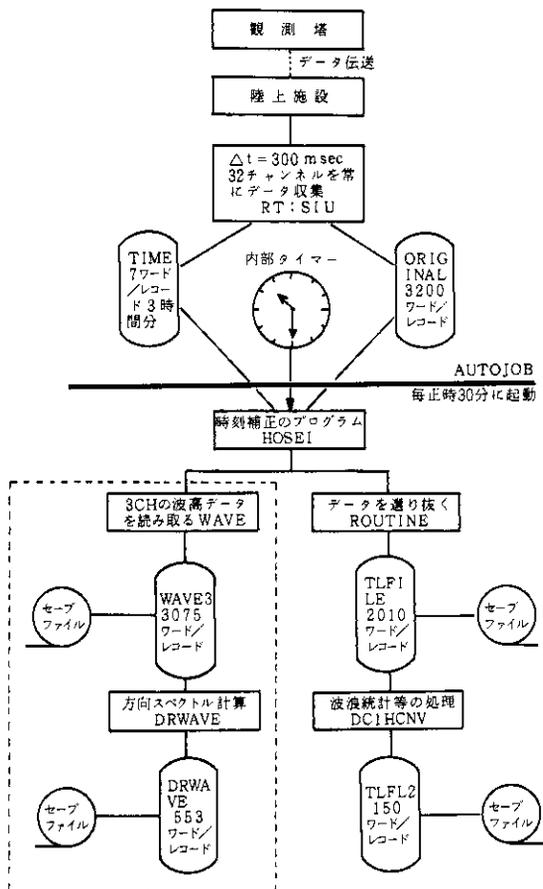


図3 方向スペクトル処理システムの流れ図 点線で囲まれた部分が図2の点線の部分に対応する。

Fig. 3 Information processing diagram of observation system for the wave height and directional wave spectrum

3. データ処理システム

波浪の方向スペクトルを算出するプログラムは、Part Iと同様にAUTOJOBプログラムで毎正時30分に起動がかり、実行される。この処理は図3で分るように、従来の波高観測のデータ処理(DC1HCNV)が完了した後に行われる。プログラムは生データを取り込むプログラム(WAVE)と方向スペクトルを計算するプログラム(DRWAVE)から構成される。

プログラムWAVEにおいて、補正されたORIGINALファイルとTIMEファイルから、起動がかかった時刻の2時間前の正時前後5分間(サンプリング間隔0.3秒で、合計約10分間)の波高データを読み込み、WAVE3ファイルに書き込む。データの正確な長さは、データ個数2048×3チャンネル分となる。プログラムWAVEのフローチャート及びリストは、それぞれ図4と付録に示した。WAVE3ファイルは図5に示すように、1レコード3075ワ

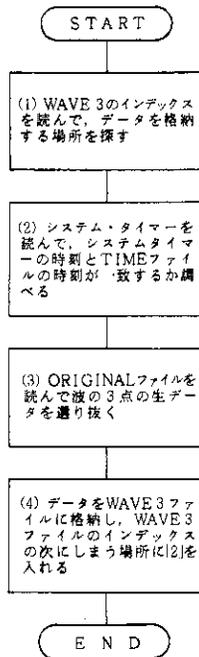


図4 プログラムWAVE の処
理手順 詳しい流れ図
は付録の図16に示した。

Fig. 4 Processing diagram of
program "WAVE"

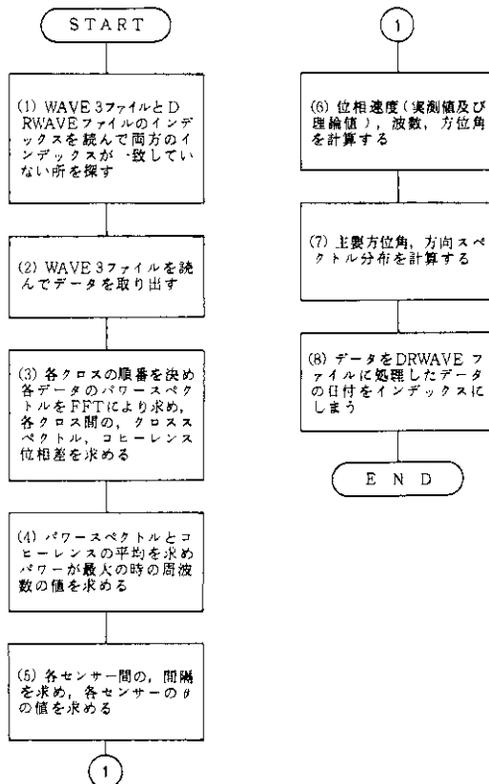


図6 プログラムDRWAVE の
処理手順 詳しい流れ
図は付録の図17に示した。

Fig. 6 Processing diagram of
program "DRWAVE"

1	2	3	4	5	-----	1027	1028	-----	2051	2052	-----	3075
年	日	分	1-CH DATA ↓	3	-----	2047	2-CH DATA ↓	-----	2047	3-CH DATA ↓	-----	2047
月	時	秒	2	4	-----	2048	2	-----	2048	2	-----	2048

図5 WAVE 3 ファイルの構成

Fig. 5 Format diagram of file "WAVE3"

1	2	3	4	5	6	7	-----	31	32	-----	44
年	月	日	時	分	秒	平均 コヒーレンス	-----	平均 コヒーレンス	方 位 (実測値) 角	-----	方 位 (実測値) 角
45	-----	57	58	-----	70	71	-----	551	552	553	
方 位 論 値 角	-----	方 位 論 値 角	周 波 数	-----	周 波 数	方 ス ベ ク ト ル	-----	方 ス ベ ク ト ル	最 大 パ ワ ー	最 大 パ ワ ー	

図7 DRWAVE ファイルの構成

Fig. 7 Format diagram of file "DRWAVE"

ードから構成される。

DRWAVE プログラムにおいて、WAVE 3 ファイルより三つのチャンネルの波高の生データを讀んで、第4章で述べる解析法に従って、方向スペクトル、コヒーレンス及び主要方位角分布を計算し、DRWAVE ファイルに書き込む。このプログラムのフローチャート及びリストは、それぞれ図6と付録に示した。DRWAVE ファイルは図7に示すように、1レコード当り553ワードから構成される。

WAVE 3 ファイル及びDRWAVE ファイルはともに840レコードの大きさとした。これらは35日分のデータが記憶できるために、1カ月ごとに磁気テープに移し換えられる。上述した方向スペクトル処理システムは概略的に図2に示されているように、Part I での波高処理システムに組み込むことができた。

4. 解析法

4.1 方向スペクトルの関係式

Barber の方法を用いて、相異なる三点の波高データから方向スペクトルを計算する関係式を導出する。Part I では、1点の波高データからパワースペクトルを求めた。水面変位はPart I の式(3)で、エネルギー密度は式(4)で評価した。ここでは水面変位 η_i とエネルギー

密度 E_{nm} は次のように二次元的に表される。

$$\begin{aligned} \eta_i(t) = & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{nm} \cos(x_i k_n \cos \theta_{nm} + y_i k_n \sin \theta_{nm} + 2\pi f_n t) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M b_{nm} \sin(x_i k_n \cos \theta_{nm} + y_i k_n \sin \theta_{nm} + 2\pi f_n t) \quad (1) \\ & i = 1, 2, \dots, p \end{aligned}$$

$$E_{nm} = \frac{1}{2} (a_{nm}^2 + b_{nm}^2) / \Delta f \Delta \theta \quad (2)$$

ここで k と f はそれぞれ波浪の成分波の波数と周波数を表す。 a_{nm} , b_{nm} はバンド幅 Δf , $\Delta \theta$ に対する振幅で, (x_i, y_i) は観測点の座標, 添字 n , m はそれぞれ周波数の方位に関してのバンドの番号, p は観測点の数となる。方向スペクトル E はクロス・スペクトル ($\text{Co} + i \text{Qu}$) で表される。 Co と Qu はそれぞれコ・スペクトルとクオドラチャ・スペクトルと呼ばれる。

$$E(l, m, f) = \iint [\text{Co}(X, Y, f) + i \text{Qu}(X, Y, f)] e^{-2\pi i(lX + mY)} dXdY \quad (3)$$

ここで l , m はそれぞれ X 軸と Y 軸の方向の波数成分となる。上式から, クロス・スペクトルを求めれば方向スペクトル E が計算されることになる。この計算を実行するためには, 次の二つの仮定を必要とする。第一の仮定は波浪の場がエルゴート性を有する定常的なランダム過程を有することである。この仮定によって, クロス・スペクトルは時空間すべてにわたって平均化を必要としない。すなわち, 多数の波高計センサの配置による観測を必ずしも必要とせず, 数少ない(ただし三本以上)センサであっても十分な時間にわたって観測できれば, 統計的にエルゴート性が満足されていると考えられる。第二の仮定は Barber 法の仮定である。すなわち, センサ間の位置ベクトルで決まる間隔ベクトルが存在するところのみクロス・スペクトルの値を与え, それ以外はゼロとするものである。これらの二つの仮定を用いて, 三本の波高計センサによる方向スペクトル E を計算する式は徳田(1982)によって与えられ, 次式となる。

$$E(k, f) = \text{Co}(0, f) + 2 \sum_{n=1}^3 \left\{ \text{Co}(X_n, f) \cos k \cdot X_n + \text{Qu}(X_n, f) \sin k \cdot X_n \right\} \quad (4)$$

$$k = (2\pi l, 2\pi m), \quad X_n = (X_n, Y_n) \quad (5)$$

上式から、方向スペクトル E は三点間のクロス・スペクトルから求められる。よってクロス・スペクトルが求まれば方向スペクトルが計算できる。

クロス・スペクトルは、相異なる二つの観測点の波高変動の相互関数に基づいている。このために、クロス・スペクトルは二点間の位相情報をも含み、複素数で表される。一方、パワースペクトルは一つの観測点の波高変動の自己相関関数に基づくために、位相差は生じず実数で表される。観測点①と②における波高をそれぞれ η_1 と η_2 とする。これらのクロス・スペクトルを求める。波高変動はPart Iの式(3)と同じ表現となる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_1(j) &= \sum_{i=0}^{N/2} \left\{ A_i(1) \cos \frac{2\pi}{N} i j + B_i(1) \sin \frac{2\pi}{N} i j \right\} \\ \eta_2(j) &= \sum_{i=0}^{N/2} \left\{ A_i(2) \cos \frac{2\pi}{N} i j + B_i(2) \sin \frac{2\pi}{N} i j \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

式(6)のフーリエ係数、すなわち成分波の振幅は時系列データからFFT法で計算される。これらの係数を $C = A_i + i B_i$ とおく。それらの積

$$C(1) \cdot C^*(2) = \left\{ A_i(1)A_i(2) + B_i(1)B_i(2) \right\} + i \left\{ A_i(2)B_i(1) - A_i(1)B_i(2) \right\}$$

とPart Iの式(4)から、一次クロス・スペクトルは次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Co}_{12}(f_i) &= \frac{2}{\Delta f} \left\{ A_i(1)A_i(2) + B_i(1)B_i(2) \right\} \\ \text{Qu}_{12}(f_i) &= -\frac{2}{\Delta f} \left\{ A_i(2)B_i(1) - A_i(1)B_i(2) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで波の方位角を伝播して来た方位角とするために、クロス・スペクトル Qu にマイナスをかけた。統計的に安定な結果を得るために、式(8)で計算されるような適当なフィルターによって平滑化する。この平滑化されたスペクトルを二次スペクトルと呼ぶ。添字 p, q は添字 r を中心とする平滑領域の周波数番号とする。

$$\left. \begin{aligned} \text{Co}_{12}(f_r) &= \frac{1}{w} \sum_{i=p}^q \text{Co}_{12}(f_i) = \text{Co}_1(f_r) \\ \text{Qu}_{12}(f_r) &= \frac{1}{w} \sum_{i=p}^q \text{Qu}_{12}(f_i) = \text{Qu}_1(f_r) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$f_r = r / (2M \Delta t) = r \cdot \Delta f, \quad \Delta f = 1 / (2M \Delta t), \quad r = 0, 1, \dots, M$$

ここで M はラグ数, w は重み関係となる. パワースペクトルは次式となる.

$$\left. \begin{aligned} \phi_1(f_r) &= \frac{1}{w} \sum_{i=p}^q \phi_1(f_i) = \frac{2}{w \Delta f} \sum_{i=p}^q \{ A_i(1) \cdot A_i(1) + B_i(1) \cdot B_i(1) \} \\ \phi_2(f_r) &= \frac{1}{w} \sum_{i=p}^q \phi_2(f_i) = \frac{2}{w \Delta f} \sum_{i=p}^q \{ A_i(2) \cdot A_i(2) + B_i(2) \cdot B_i(2) \} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

コヒーレンス $R_1(f_r)$ と位相差 $\nu_1(f_r)$ は次式で表される.

$$R_1(f_r) = \sqrt{\frac{Co_1^2(f_r) + Qu_1^2(f_r)}{\phi_1(f_r) \cdot \phi_2(f_r)}} \quad (10)$$

$$\nu_1(f_r) = \tan^{-1} Qu_1(f_r) / Co_1(f_r) \quad (11)$$

コヒーレンスは2点間の相関係数を表し, 物理的には波がセンサ間でどれくらい保存されて伝播したかの目安となる.

4.2 計算手順

(1) 各観測点の成分波の振幅及びパワースペクトルの計算

成分波の振幅は各観測点の波高データからFFT法で求められ, パワースペクトルは式(9)で計算される.

成分波の振幅: $A_i(j), B_i(j), j = 0, 1, \dots, N/2$

パワースペクトル: $\phi_i(f_r), r = 0, 1, \dots, M$

$$i = 1, 2, 3$$

添字 i は図1に示した観測番号とする. 添字 j と r はそれぞれ一次と二次のスペクトルの周波数番号を示す.

(2) 各観測点間のクロス・スペクトル, コヒーレンス及び位相差の計算

クロス・スペクトルに関して, センサ①と②に対しては式(7)と(8)で, センサ②と③及び③と①に対してはそれぞれ次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} Co_2(f_r) &= \frac{2}{w \Delta f} \sum_{i=p}^q \{ A_i(3) A_i(2) + B_i(3) B_i(2) \} \\ Qu_2(f_r) &= -\frac{2}{w \Delta f} \sum_{i=p}^q \{ A_i(3) B_i(2) - A_i(2) B_i(3) \} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Co}_3(f_r) &= \frac{2}{w \Delta f} \sum_{i=p}^q \{ A_i(3) A_i(1) + B_i(3) B_i(1) \} \\ \text{Qu}_3(f_r) &= -\frac{2}{w \Delta f} \sum_{i=p}^q \{ A_i(3) B_i(1) - A_i(1) B_i(3) \} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

コヒーレンス及び位相差はそれぞれ式(10)と(11)から容易に類推される。

(3) 方向スペクトルの計算

式(4)から、方向スペクトルは次のように示される。

$$E(k, f) = \text{Co}(0, f) + 2 \sum_{i=1}^3 \{ \text{Co}_i \cos(k \cdot X_i) + \text{Qu}_i \sin(k \cdot X_i) \} \quad (14)$$

センサの位置ベクトル x_i と間隔ベクトル X_i の関係を図1に示したように定義すると、間隔ベクトルは次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= x_2 - x_1, \quad X_2 = x_3 - x_2, \quad X_3 = x_3 - x_1 \\ X_i &= (D_i \sin \theta_i, D_i \cos \theta_i), \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

方向スペクトルは式(14)と(15)から、

$$\begin{aligned} E(\theta, f) &= \phi(f) + 2 \{ \text{Co}_1(f) \cos(k D_1 \cos(\theta - \theta_1)) + \text{Qu}_1(f) \sin(k D_1 \cos(\theta - \theta_1)) \\ &\quad + \text{Co}_2(f) \cos(k D_2 \cos(\theta - \theta_2)) + \text{Qu}_2(f) \sin(k D_2 \cos(\theta - \theta_2)) \\ &\quad + \text{Co}_3(f) \cos(k D_3 \cos(\theta - \theta_3)) + \text{Qu}_3(f) \sin(k D_3 \cos(\theta - \theta_3)) \} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $k = (k \sin \theta, k \cos \theta)$ 、式(16)において、周波数 f に対してクロス・スペクトル Co_i 、 Qu_i と、波高計センサ間隔 D_i 、 θ_i が与えられても、方向スペクトルは計算できない。なぜなら、波数 k が未知数であるからである。このために、波浪の分散関係(位相速度)を必要とする。分散関係は一般に水の波の理論式を用いる。すなわち、

$$2 \pi f = \sqrt{g k^2 \tanh k d} \quad (17)$$

ここで d は水深である。我々の定時観測においても、分散関係として観測値でなく、理論式(17)を採用した。その理由は理論値を用いた方が周波数全域にわたって安定した分布が得られるためである。すなわち、観測値は第5.2節で示されるように、エネルギーが集中する主要周波数領域では高い精度で求められ、その値は理論値とよく一致するが、測定範囲をこえる高周波領域に対して大きな誤差をもつからである。

位相速度 c を観測から求める方法を示す。図 1 に示すような、正弦波（進行方位角 θ ，周波数 f ）を考える。波は最初にセンサ①を通り，センサ②，③と伝播していく。センサ①と②間及び①と③間の伝播時間は次式となる。

$$t_1 = \nu_1 / 2\pi f, \quad t_3 = \nu_3 / 2\pi f \quad (18)$$

位相速度は 2 点間の距離 ÷ 伝播時間から計算される。

$$c = D_1 \cos(\theta - \theta_1) / t_1 = D_3 \cos(\theta - \theta_3) / t_3 \quad (19)$$

上式から，主要方位角 θ も求めることができる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D_1 \cos \theta_1 - D_3 t \cos \theta_3}{D_1 \sin \theta_1 - D_3 t \sin \theta_3} \right), \quad t = t_1 / t_3 \quad (20)$$

位相速度において，理論と観測値の比較は第 5 章で示す。

クロス・スペクトルを計算する時，注意すべきことがある。それは二点間のクロスの順序と間隔ベクトルの取り方を統一することにある。例えば，センサ①と②のクロスにおいて，間隔ベクトルを $(a_2 - a_1, b_2 - b_1)$ と置くと，クロス・スペクトルは式(7)となる。逆に間隔ベクトルを $(a_1 - a_2, b_1 - b_2)$ とすると，一次クロス・スペクトルは下式となる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Co}_{21}(f_i) &= \frac{2}{\Delta f} \{ A_i(2)A_i(1) + B_i(2)B_i(1) \} \\ \text{Qu}_{21}(f_i) &= \frac{2}{\Delta f} \{ A_i(1)B_i(2) - A_i(2)B_i(1) \} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式(7)と式(21)を比較すると，Co スペクトルは一致するが，Qu スペクトルは符号が異なる。しかし方向スペクトルは同一の値になる。なぜなら，方向スペクトルにおいて，問題となる頃は $\text{Qu} \cdot \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{X})$ で，Qu が符号を変えると \mathbf{X} もそれに伴って符号が変わるので，二つの積は同一の値となるからである。よって，二点間のクロスの順序と間隔ベクトルの取り方を一致させて置けば，式(7)又は式(21)のいずれでもよいことになる。

5. 観測例

第 4 章で展開された式の点検と実際に解析した場合の精度を調べることにする。前者については正弦波による思考実験から，後者については代表的な実測データの解析から検討する。

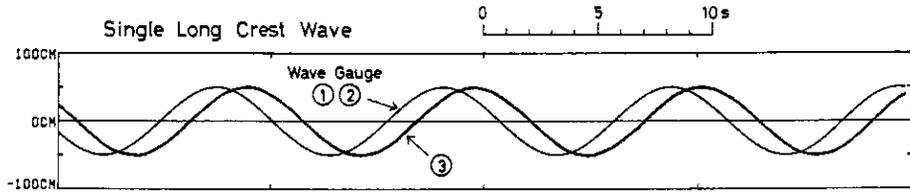


図8 各観測点の正弦波の時系列 入力波は周期10秒、振幅50cmの波で、方位 $\theta = 180^\circ$ に進む。

Fig. 8 Records of single long crest wave obtained at three observation points

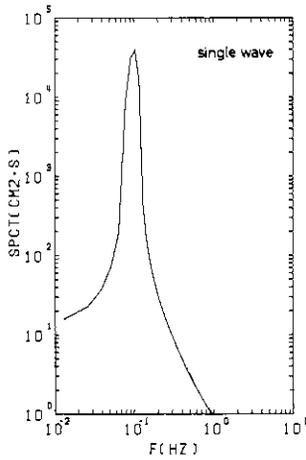


図9 正弦波の平均パワースペクトル これは三つの観測点のパワースペクトルを平均したもの。

Fig. 9 Power spectrum of single long crest wave

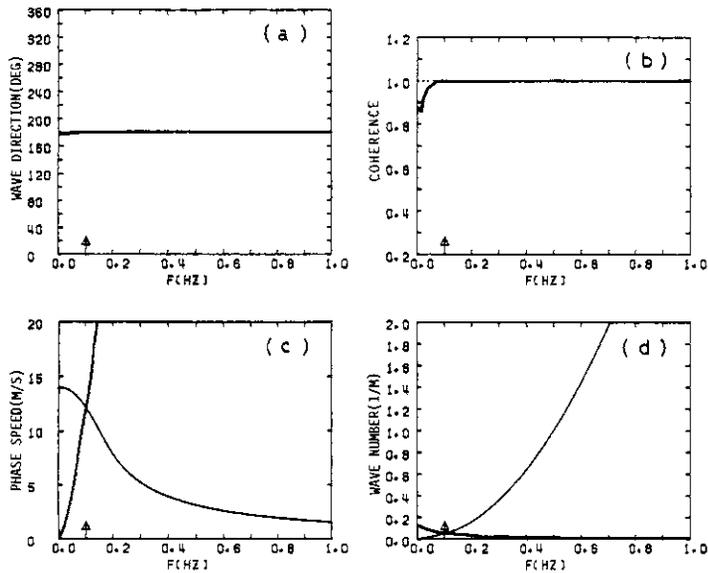


図10 正弦波の方向特性 (a)主要方位角, (b)コヒーレンス, (c)位相速度, (d)波数, (c)と(d)において、太線は観測値で、細線は理論値を表す。矢印はスペクトルピーク周波数の位置を示す。

Fig. 10 Distribution of main wave direction (a), coherence (b), phase speed (c) and wave number (d) with respect to frequency for single long crest wave. The thin lines in (c) and (d) show the theoretical values. The arrows indicate the peak frequency.

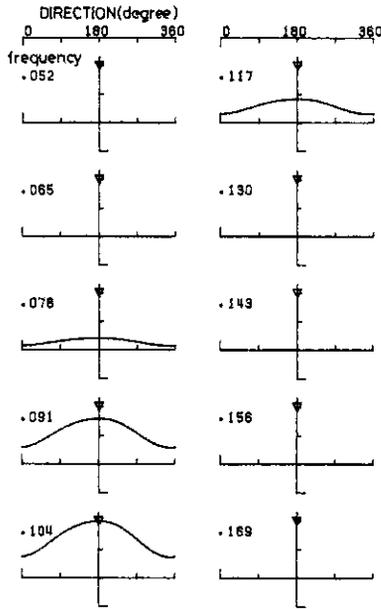


図 11 正弦波の方向スペクトル たて軸の値はスペクトルピーク値で規格化した。矢印は図10の主要方位角を示す。

Fig. 11 Normalized direction spectra for single long crest wave. The arrows indicate the main wave direction in Fig. 10.

5.1 正弦波による思考実験

正弦波 $\eta = a \cos(k_0 \cdot x - 2\pi f t)$ に対して、最初に解析的に方向スペクトルを求めることにする。単位周波数の正弦波であるため一次スペクトルで評価を行う。観測点 i での波高データは次のようになる。

$$\begin{aligned} \eta_i &= a \cos(k_0 \cdot x_i - 2\pi f t) \\ &= A_m(i) \cos 2\pi f t + B_m(i) \sin 2\pi f t \end{aligned} \quad (22)$$

$$A_m(i) = a \cos \alpha_i, \quad B_m(i) = a \sin \alpha_i \quad (23)$$

ここで、 $f = m \Delta f$, $\alpha_i = k \cdot X_i$ となる。各点のパワースペクトルは式(9)と(23)より、

$$\phi_i(f_m) = \frac{2}{\Delta f} \{ A_m(i) A_m(i) + B_m(i) B_m(i) \} = \frac{2}{\Delta f} a^2 \quad (24)$$

Co スペクトルと Qu スペクトルは式(7)より、

$$\left. \begin{aligned} Co_{21}(f_m) &= \frac{2a^2}{\Delta f} \cos(k D_1 \cos(\theta_1 - \theta_0)) \\ Co_{32}(f_m) &= \frac{2a^2}{\Delta f} \cos(k D_2 \cos(\theta_2 - \theta_0)) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

表2 観測時の風向風速と有義波高

Table 2 Characteristics of significant wave height and wind direction and speed

CASE	年月日時	風向・風速(m/s)	有義波高(cm)
A	83年11月1日 16:00	東 4.4	63.0
B	83年11月7日 4:00	北 12.8	58.0
C	83年11月18日 19:00	南西 19.7	134.1
D	83年11月30日 17:00	南 12.0	107.1

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Co}_{31}(f_m) &= \frac{2a^2}{\Delta f} \cos(kD_3 \cos(\theta_3 - \theta_0)) \\
 \text{Qu}_{21}(f_m) &= \frac{2a^2}{\Delta f} \sin(kD_1 \cos(\theta_1 - \theta_0)) \\
 \text{Qu}_{32}(f_m) &= \frac{2a^2}{\Delta f} \sin(kD_2 \cos(\theta_2 - \theta_0)) \\
 \text{Qu}_{31}(f_m) &= \frac{2a^2}{\Delta f} \sin(kD_3 \cos(\theta_3 - \theta_0))
 \end{aligned} \right\} (26)$$

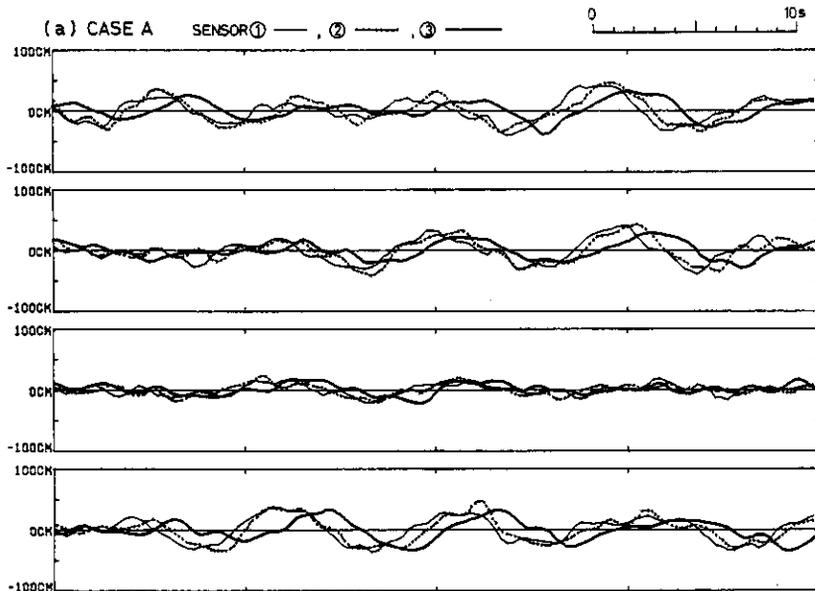


図12a 観測された代表的な波浪の時系列 (a) ケースAで東風の場合

Fig. 12a Examples of wave records at the Marine Tower for Case A and Case B.

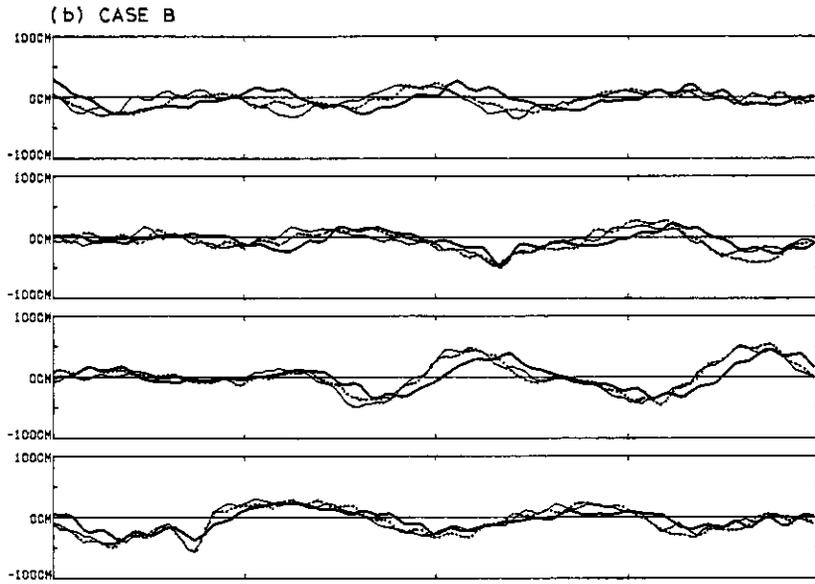


図12 a 観測された代表的な波浪の時系列 (b) ケースBで北風の場合

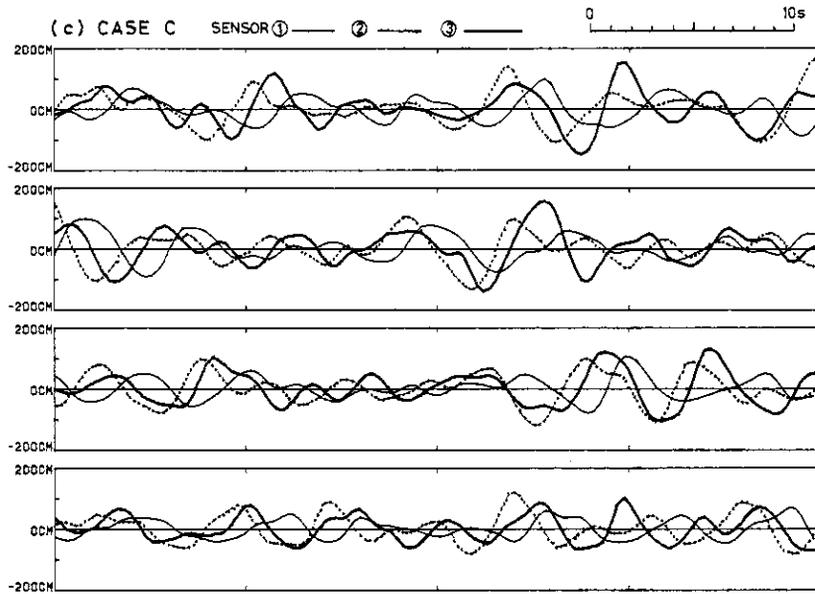


図 12 b 観測された代表的な波浪の時系列 (c) ケースCで南西の場合

Fig. 12b Examples of wave records at the Marine Tower for Case C and Case D

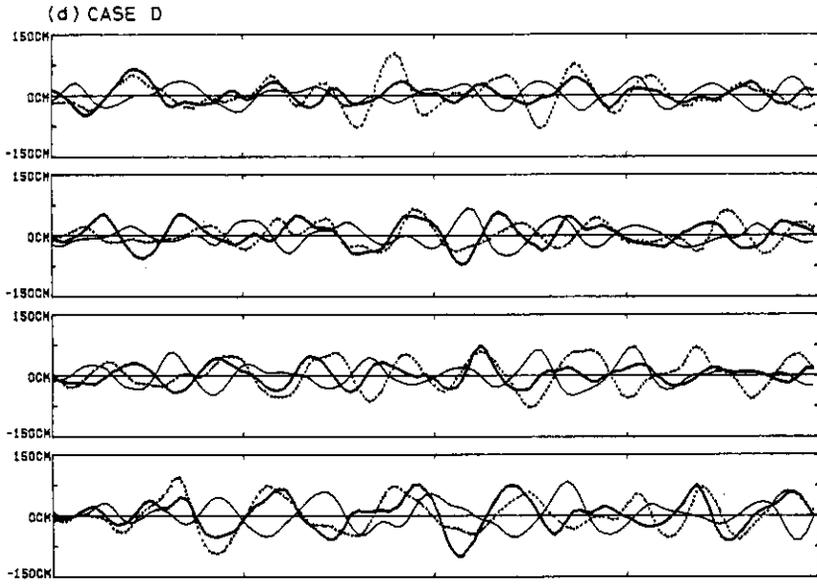


図12b 観測された代表的な波浪の時系列 (d) ケースDで南風の場合

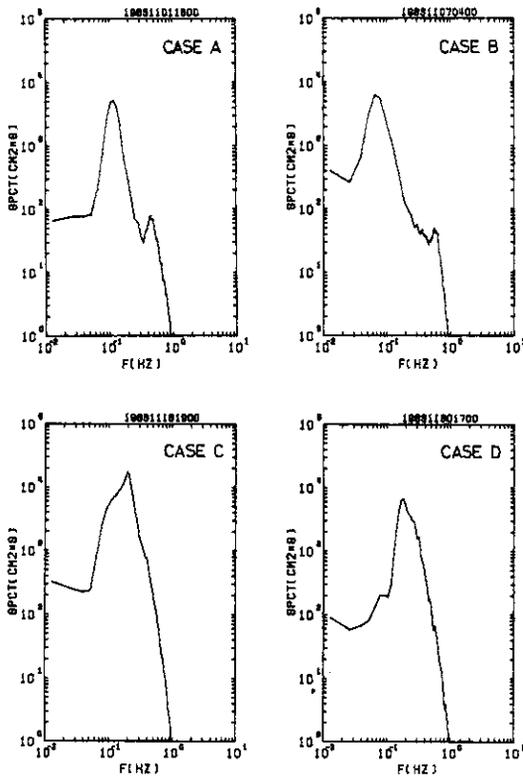


図13 波浪の平均パワースペクトル
これは三つの観測点の値を平均した
たもの。

Fig. 13 Power spectrum of coastal waves

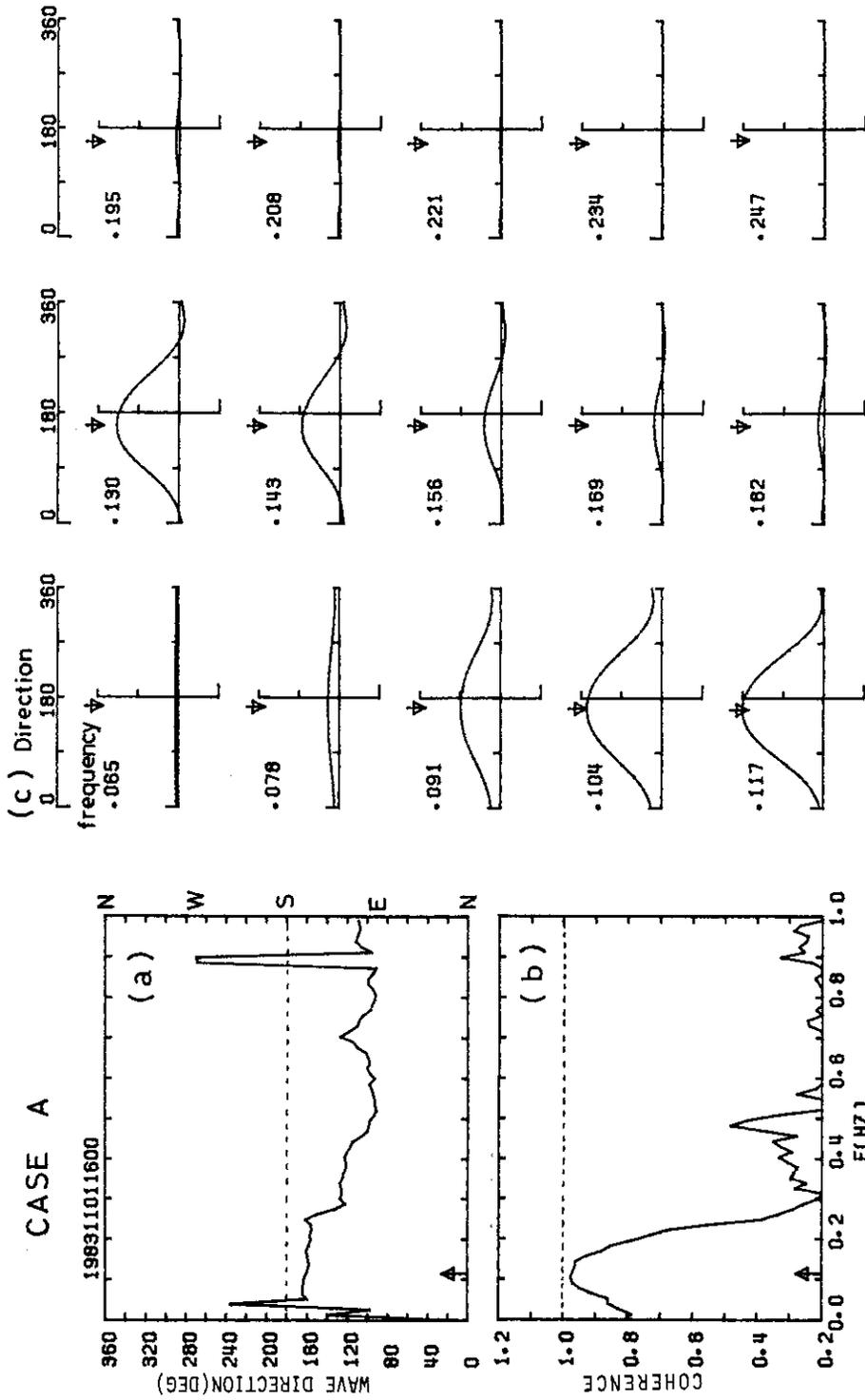


図 14a ケースAの方向スペクトル

(a) 主要方位角 (b) コヒーレンス (c) 方向スペクトル

Fig. 14a Distribution of main wave direction (a), coherence (b) and normalized direction spectra of coastal waves for Case A. The arrows in (a) and (b) indicate the peak frequency, and those in (c) the main wave direction.

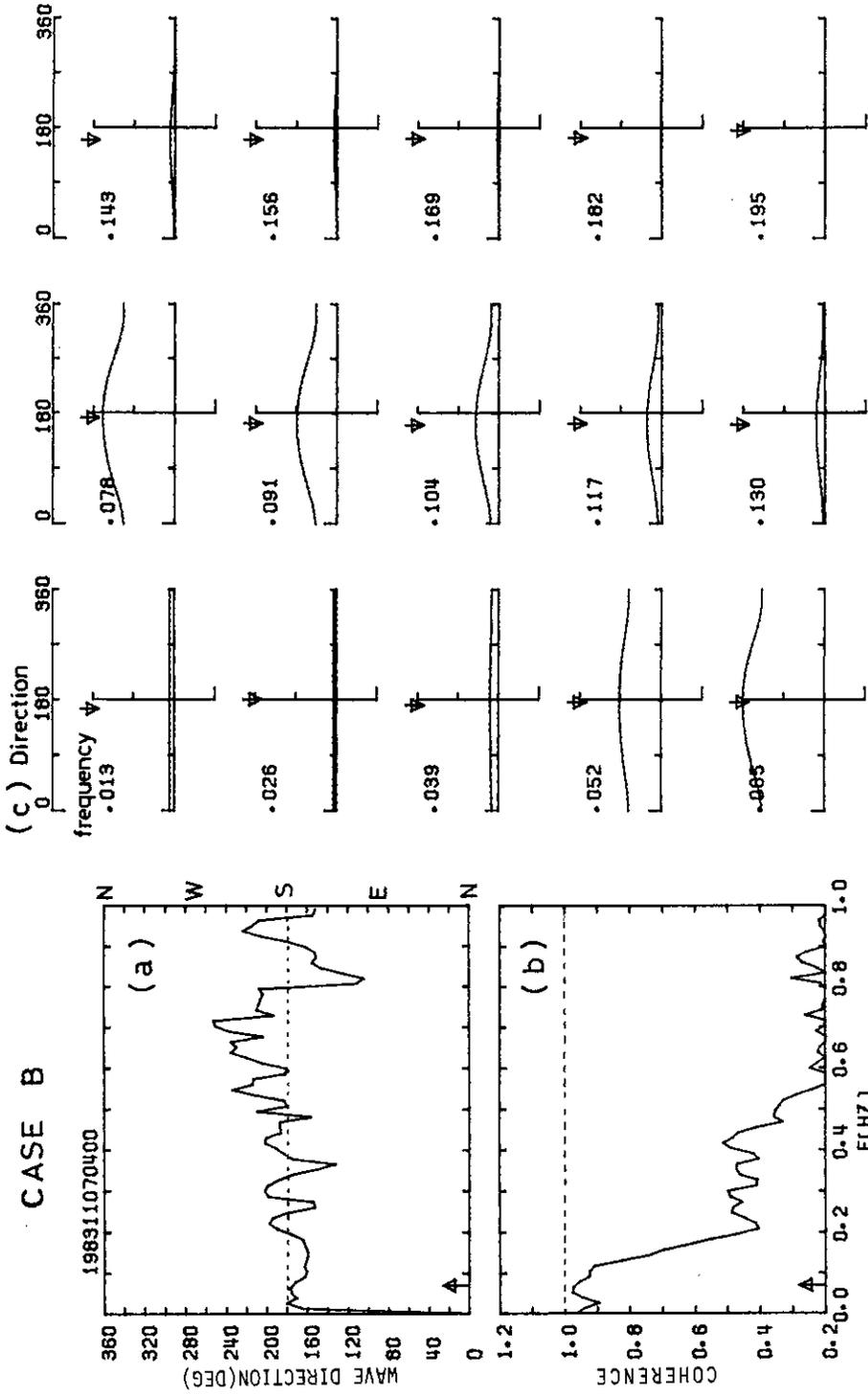


図 14 b ケース B の方向スペクトル
Fig. 14b Same as in Fig. 14a except for Case B

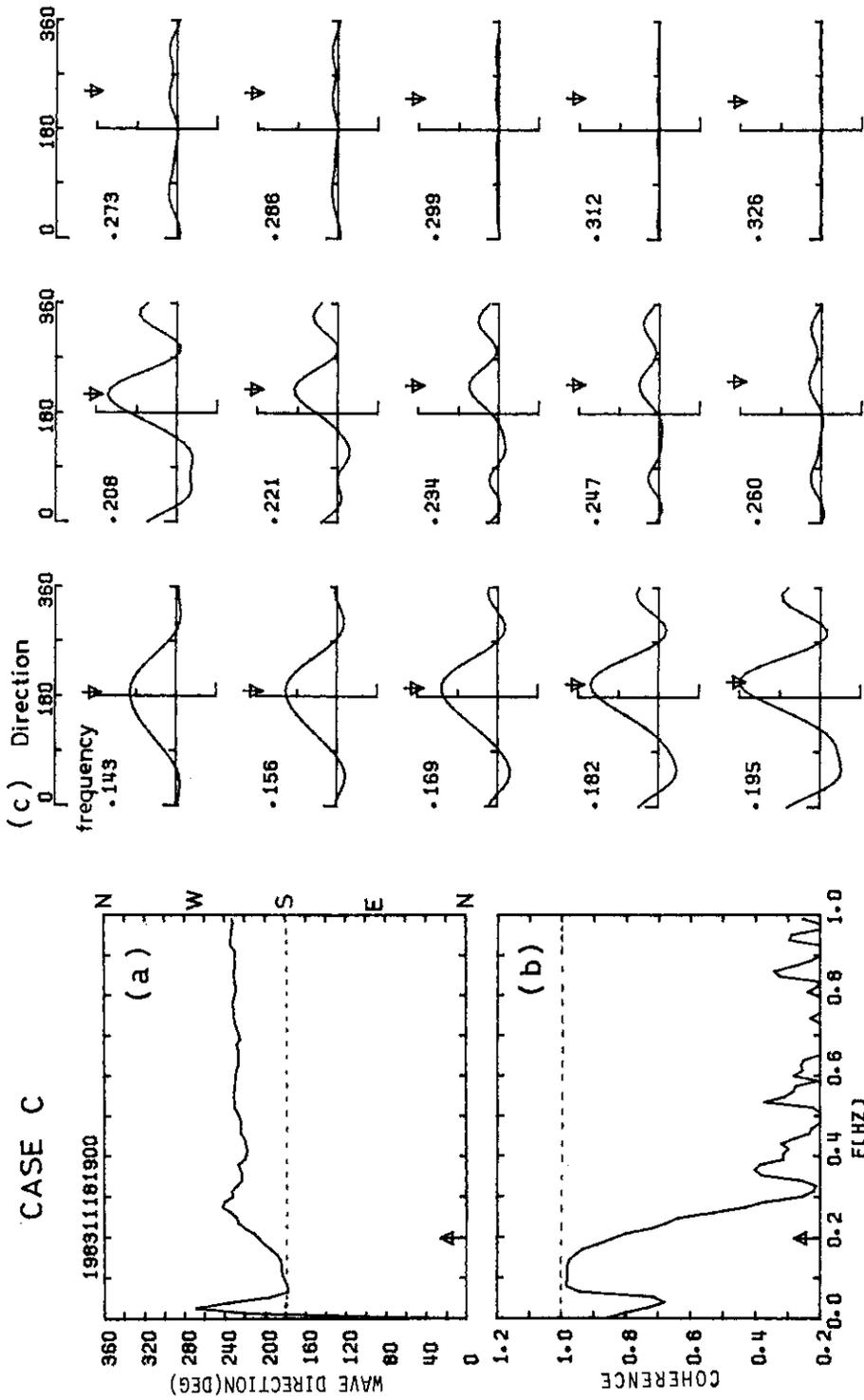


図 14c ケースCの方向スペクトル
Fig. 14c Same as in Fig. 14a except for Case C

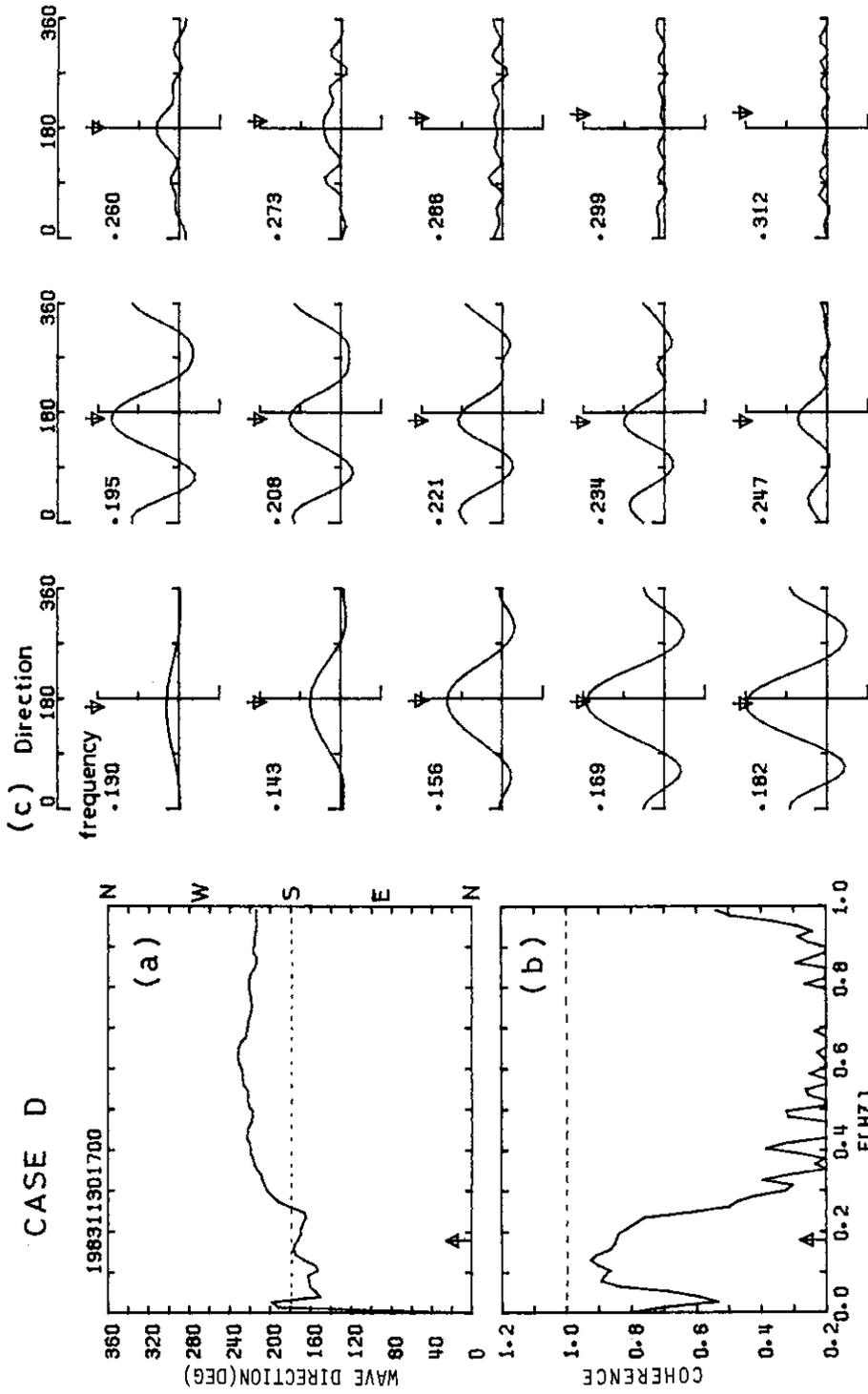


図 14d ケース D の方向スペクトル
Fig. 14d Same as in Fig. 14a except for Case D

コヒーレンス R_i は式(10)に式(24), (25), (26)を代入して容易に計算される。

$$R_1(f_m) = R_2(f_m) = R_3(f_m) = 1 \quad (27)$$

コヒーレンスが1になったことは、与えられた正弦波が完全に保存されて波高センサ間を伝播したことを意味する。

位相差は式(11)に式(25), (27)を代入することによって得られる。

$$\nu_i(f_m) = kD_i \cos(\theta_i - \theta_0), \quad i = 1, 2, 3 \quad (28)$$

センサ間の伝播時間は式(18)と式(28)より、

$$t_1 = \frac{kD_1}{2\pi f} \cos(\theta_1 - \theta_0), \quad t_3 = \frac{kD_3}{2\pi f} \cos(\theta_3 - \theta_0) \quad (29)$$

方位角 θ は式(20)と(29)から、 $\theta = \theta_0$ となる。よって解析された波の方位角は入力波のものと完全に一致した。位相速度は式(18)に式(28)と $\theta = \theta_0$ を代入すると、 $c = 2\pi f / k$ となる。よって得られた位相速度は入力波のものと完全に一致した。

方向スペクトル E は式(16)に式(25), (26)を代入して得られる。

$$E(\theta, f) = \phi(f) + \frac{4a^2}{4f} \left\{ \begin{aligned} &\cos kD_1 (\cos(\theta_1 - \theta_0) - \cos(\theta - \theta_0)) + \\ &\cos kD_2 (\cos(\theta_2 - \theta_0) - \cos(\theta - \theta_2)) + \\ &\cos kD_3 (\cos(\theta_3 - \theta_0) - \cos(\theta - \theta_3)) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

上式より、波の進行方位角 $\theta = \theta_0$ で方向スペクトルが最大になることが分る。

次に正弦波(式(22))を定時観測処理システムに入力して、数値的に方向スペクトルを求めることにする。入力波の振幅、周期及び方位角を、それぞれ50cm、10秒(周波数0.1 Hz)と180度(真南)とし、分散関係として理論式(17)を仮定した。計算機の処理結果、次の結果を得た。各観測点の波高変動は図8に、パワースペクトルは図9に、方位角、コヒーレンス及び分散関係は図10に、方向スペクトルは図11に示した。図8において、初めに波が現われるのはセンサ①、②で、それからセンサ③となる。センサ①と②の変動がほとんど重なるのは、図1のセンサの配置から分るように、センサ①と②を結ぶ線分がほぼ東西の向きで、入射する波はそれと直角に入射するためである。図9により、パワースペクトルは周波数0.1 Hzで最大のパワーをもち、すべてのセンサでほぼ同一の分布となった。全エネルギーは、 $1250 \text{ cm}^2\text{S}$ となり、 $a^2/2$ と一致した。鋭い高いピークになったのは、理想的な正弦波であ

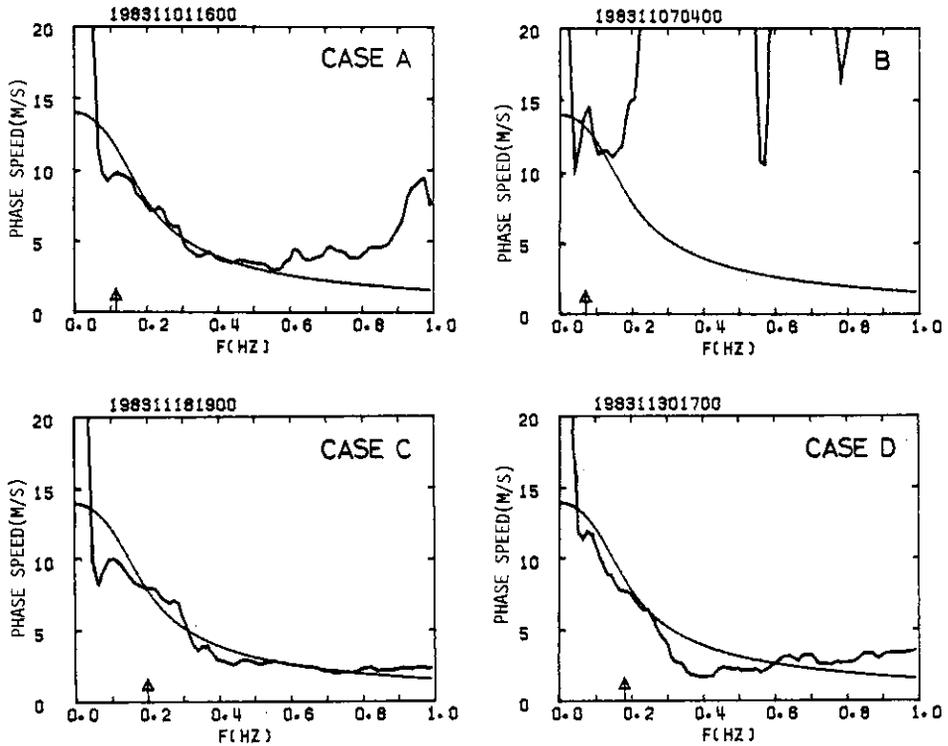


図15 波浪の位相速度
 太線は観測値で、細線は理論値を表す。矢印はスペクトルピーク周波数を示す。
 Fig. 15 Comparison of phase speed between the observational and the theoretical value. The arrows indicate the peak frequency.

ることによる。データの長さを無限にとれば、すなわち周波数分解能を無限大にとれば、エネルギー分布はデルタ関数となり、ピーク値は無限大となる。しかし全エネルギーは一定値 $a^2/2$ となる。図10により、方位角は 180° 、コヒーレンスは1となる。位相速度は周波数 0.1 Hz で理論値と一致した。図11により、方向スペクトル分布は周波数 0.1 Hz で最大値となり、その方位角 180 度である。

以上のことから、計算機から得られた結果は入力波の特性（周波数、パワースペクトル、方位角等）と一致するものであった。これにより、開発された方向スペクトルに関する計算式は、実用的に十分な精度をもつことが示された。

5.2 実 例

方向スペクトルの定時観測は1983年11月から開始された。11月の観測結果の中から代表的な四つの実例を選び、それらの結果をもとに開発された観測システムの特性について議論す

る。11月の風向風速及び有義波高の特徴はPart Iの図24に示した。これらの実例は表2から分るように、それぞれ風向が東、北、南西、南に卓越する気象条件下で観測されたものである。これらの結果は波高変動について図12に、パワースペクトルについて図13に、方向スペクトルについて図14に示した。波浪の場の特徴は風とうねりの特性から、次のように予測される。ケースAとBは、南から伝播して来たうねりの上に局所的な比較的弱い風による風浪が発達した場合である。風浪は風向方向に卓越する。ケースCは、南から伝播して来たうねりの上に強い南西の風による風浪が発達した場合である。ケースDは強い南風によって発達した風浪の場合である。この波浪の場はほとんどうねりを含まない純粋な風浪場と言える。上述の予測された波浪の特徴は、観測されたパワースペクトル分布と方向スペクトル分布から明らかに示されることである。とくにケースCは南からのうねりと南西からの風浪をほぼ分離して観測されている。

検討すべき点として、ケースAとBの風浪の方向スペクトル分布にある。パワースペクトル(図13)から、これらの風浪のピーク周波数は約0.4 Hzと0.6 Hzとなる。方向スペクトル(図14a, b)において、これらの成分波が東と北の方位でエネルギーが卓越していなくてはならないことになる。しかし観測された分布にはいずれの波も卓越していない。この理由には二つのことが考えられる。第一は風浪のエネルギーが非常に小さいことである。しかし、これは決定的な要因でない。第二は観測塔に設置された三本のセンサの方向分解能が低いことである。これは決定的な要因である。徳田(1982)によれば、波長 λ をもつ成分波の方向分布を計測するためには、代表的な波高計センサ間隔 D が次式で示される範囲にあることが必要となる。

$$0.1 < D/\lambda < 0.5 \quad (31)$$

図1から $D \approx 13m$ となる。この値と式(31)から、波長 λ 及び周波数 f に対して次のようになる。

$$26 m < \lambda < 130 m, 0.09 < f < 0.25 \quad (32)$$

この領域を方向スペクトルの主要周波数領域と呼ぶことにする。ケースAとBの風浪成分はその波長が非常に小さく上式を満たさず、我々の波高計システムでは検出できない波と言える。上記の主要周波数領域を図14のコヒーレンスから検討する。この図から、主要周波数領域は0.5以上の値をもつ特徴的なコヒーレンス分布をもつ。その分布はとくに高周波側の境界(0.25 Hz)を越えると、急激に小さくなる。他方、この周波数領域に属する成分波は、強い保存性を有しながらセンサ間を通過する波と言える。したがって、主要周波数領域においてのみ、信頼のある方向スペクトルそして位相速度分布が得られることになる。

最後に、位相速度について述べることにする。図15に、観測値と理論値の比較を示した。この図より、両者は方向スペクトルの主要周波数領域でよく一致した。このことはうねりに

対して徳田(1983)によってすでに示された。力石(1978)は風洞水槽実験の風波の位相速度が理論値と一致せず、その差が非常に大きいことに注目した。そして位相速度の相違による方向スペクトル分布への影響は無視できないことを示した。海の波浪に対して、位相速度の相違はすでに示したようにあまり大きくないので、方向スペクトルを評価する時、位相速度として理論値を用いても大きな誤差を生じないと言える。

6. 結 論

波の方向分解能を高めるためには、より多くの波高計センサを設置する必要がある。しかし実際に海上に多くの波高計センサを設置し、かつ保守することは不可能に近い。このようなことから、最小の数のセンサすなわち三本のセンサに対して、どのくらい信頼できる方向スペクトルが得られるかを調べることは意味がある。

観測塔に設置された三本の波高計センサによる定時方向スペクトル観測システムを作り、これをPart Iで示した定時波高システムに組み入れた。用いた方向スペクトル解析法はBarber法によった。システムの特徴は正弦波による思考実験と代表的な四つの観測例から調べられた。代表的な波高計センサ間隔できまる方向スペクトルの主要周波数領域は、平塚沖観測塔ではほぼエネルギーが集中する周波数領域と一致した。この領域にある成分波に対して、コヒーレンスが高く、信頼のある方向スペクトルそして位相速度分布が得られた。

平塚沖観測塔付近は比較的単純な波浪場となる。その原因は水深が20mであり、海岸線がほぼ東西に平行に走っており、さらに相模湾は南に開口していることによる。このために、外洋からの波浪は湾奥に進むにつれて南の方位をとることになる。このような比較的単純な波浪場に対して、本観測システムは有効となるが、より複雑な波浪場に対しても有効であると必ずしも言えない。また比較的波長が短い風浪に対しても方向分解能が良くない。このようなことを改善するためには、センサの数を増すことである。しかし、このことは初めに述べたように非常に多くの労力を必要とする。

上述したことの解決策として、二つのことが考えられる。第一は別の種類の測器を用いること。例えばレスポンスが早い流速計(電磁流速計, 超音波流速計)によって流れの方から、波浪の方向スペクトルを求めることである。第二は解析法の改善である。Barber法は波浪の波面を正弦波の成分波の重ね合せとし、かつセンサ間隔が存在しないところをゼロと仮定するために、方向分解能が良くない。今日までBarber法を改善してより高い方向分解能が得られる方法が多く研究されて来たが、ここで議論した三本の波高計センサの観測のデータ解析に有益なものはほとんどない。しかし徳田(1983)が示した個々波法は上記の仮定を用いないために、高い方向分解能が期待される。今後はこの方法をさらに研究し、実際の波浪への実用的な適用を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) Barber, N.F. (1961): The directional resolving power of an array of wave detectors. Ocean Wave Spectra. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, Inc., 137-150.
- 2) 徳田正幸 (1982): 三本の波高計センサによる波浪の方向特性の算出法. I. 実験室の風波の方向特性. 国立防災科学技術センター研究報告, 第29号, 157-192.
- 3) 徳田正幸 (1983): 三本の波高計センサによる波浪の方向特性の算出法. II. 観測で観測されたうねりの方向特性. 国立防災科学技術センター研究報告, 第30号, 167-187.
- 4) Rikiishi, K. (1978): A new method for measuring the directional wave spectrum. Part II. Measurement of the directional spectrum and phase velocity of laboratory wind waves. J. Phys. Oceanogr., 8, 519-529.
- 5) 渡部 勲・徳田正幸 (1984): 沿岸波浪観測システムに関する研究. I. 波高の定時観測. 国立防災科学技術センター研究速報, 第16号, 1-23.

(1984年11月5日 原稿受理)

付 録

Appendix

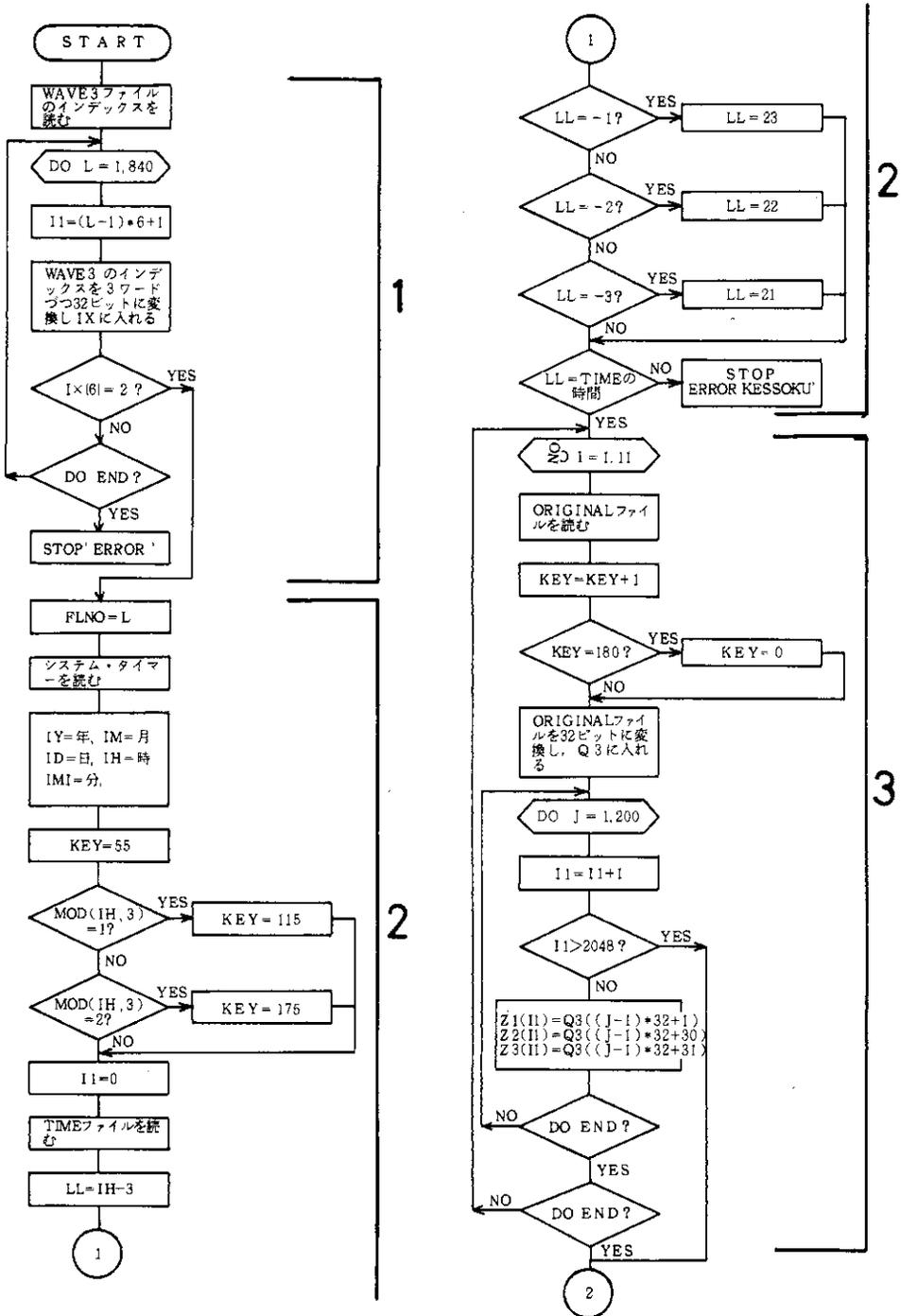
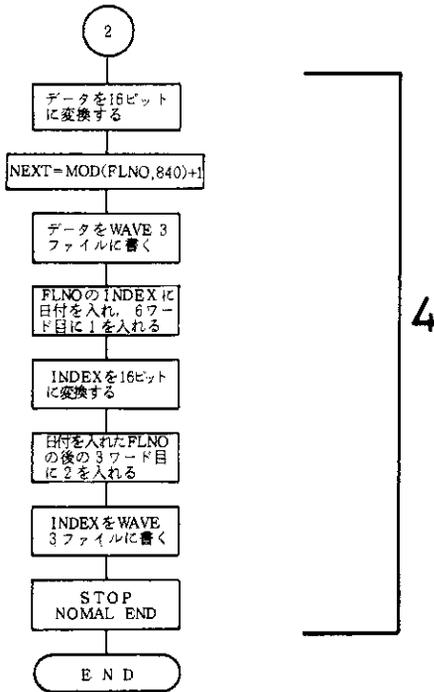


図16 プログラムWAVEの詳しい流れ図 番号は図4の番号と対応する。
 Fig. 16 Detailed flow chart of program "WAVE"



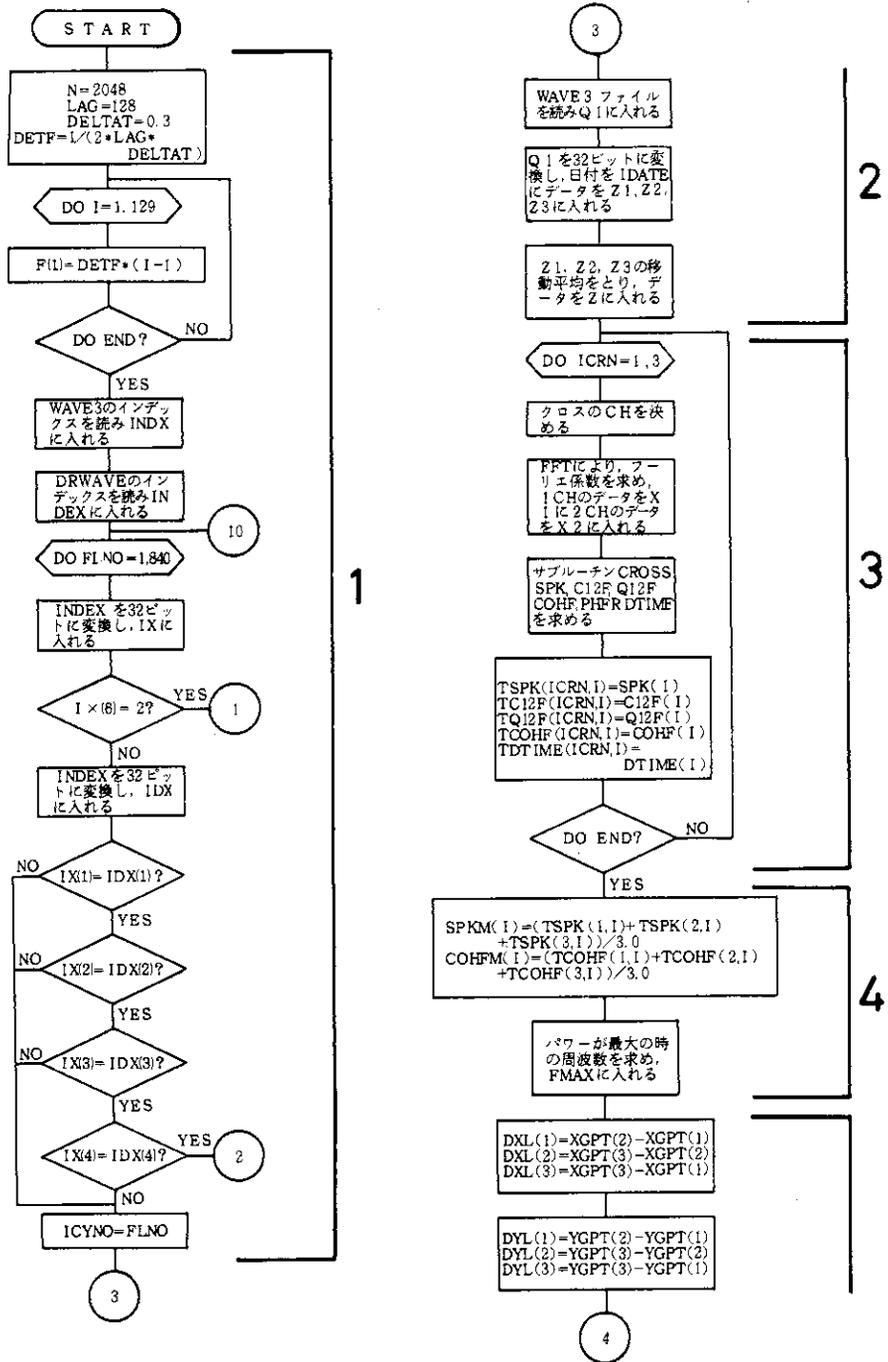
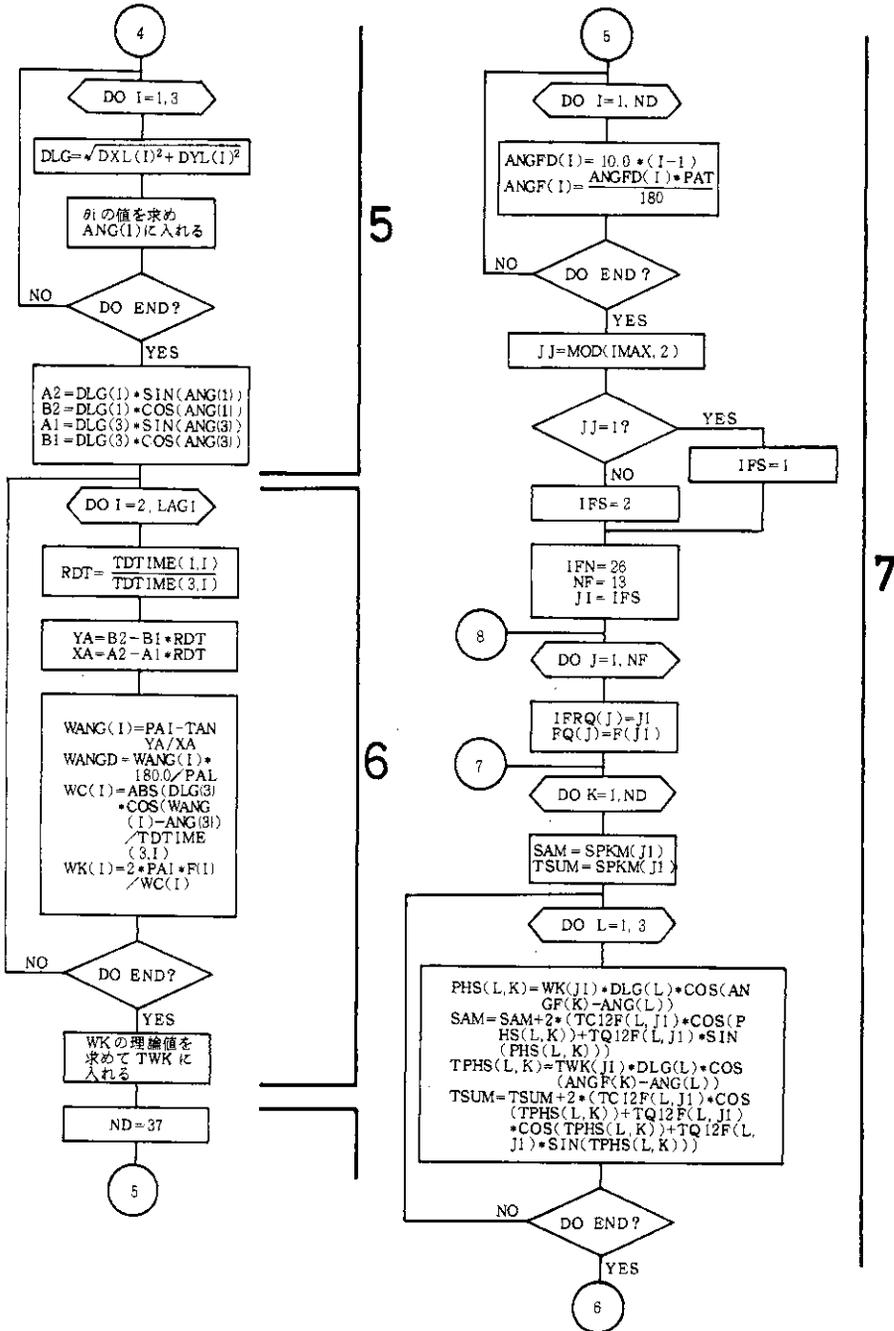
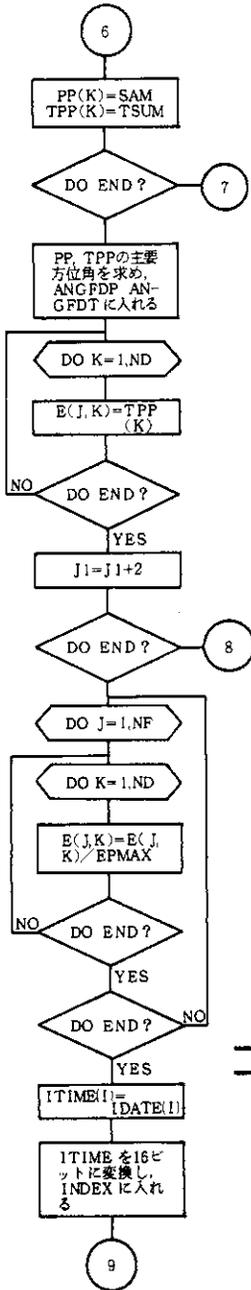
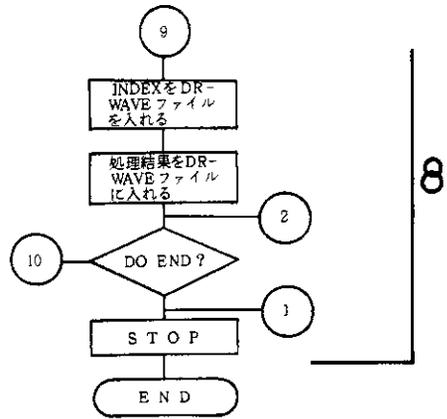


図17 プログラムDRWAVEの詳しい流れ図 番号は図6の番号と対応する。
Fig. 17 Detailed flow chart of program "DRWAVE"





7



8

サブルーチン CROSS の流れ図

