

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 32      NO. 2      JUNE 1993

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第32巻 第2号 (Vol. 32, No. 2) 1993年6月 (June, 1993)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発 ..... 後藤智明・佐藤一央 ..... 3  
(Development of Tsunami Numerical Simulation System for Sanriku  
Coast in Japan  
..... Chiaki GOTO and Kazuo SATO)
2. 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報) - いわき沖の観測結果 -  
..... 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 ..... 45  
(On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas  
- 1st Report: The Field Observation off Iwaki -  
..... Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI)
3. 沿岸波浪の日変動特性と波浪の特異日 ..... 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 ..... 115  
(Annual Fluctuation of the Observed Coastal Waves and Singularities of High  
and Low Wave Condition  
..... Toshihiko NAGAI, Kazuteru SUGAHARA, Noriaki HASHIMOTO and Tadashi ASAI)
4. 事前混合処理工法による処理土の静的土圧特性  
..... 善 功企・山崎浩之・館下 徹・長沢啓介 ..... 153  
(Static Earth Pressure Characteristics of Coment Treated Sand by  
Premixing Method  
... Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI, Toru TACHISHITA and Keisuke NAGASAWA)
5. 低置換率 SCP 改良地盤中の矢板式岸壁の挙動 ..... 北詰昌樹・村上喜代治 ..... 183  
(Behavior of Sheet Pile Walls in the Improved Ground by Sand Compaction  
Piles of Low Replacement Area Ratio  
..... Masaki KITAZUME and Kiyohara MURAKAMI)
6. 費用便益分析による接岸ドルフィンの最適断面の評価 ..... 白石 悟・上田 茂 ..... 213  
(Evaluation of the Optimal Cross Section of Breasting Dolphins by use of  
Coast-benefit Analysis ..... Satoru SHIRAISHI and Shigeru UEDA)
7. マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性  
- 主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験 -  
..... 福手 勤・守分敦郎・鈴木康範 ..... 247  
(An Experimental Study on Mortars to Assess the Durability of Massive  
Concrete  
..... Tsutomu FUKUTE, Atsurou MORIWAKE and Yasunori SUZUKI)

## 2. 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

### — いわき沖の観測結果 —

永井紀彦\*  
橋本典明\*\*  
浅井正\*\*\*

#### 要 旨

沖波の方向スペクトルの出現特性を明らかにすることは、海洋波の特性を把握する上で極めて重要である。しかしながら、沖波の方向スペクトルの出現特性ははまだ十分に明らかにされておらず、方向集中度パラメータなどを用いて便宜的にその分布形状を表しているにすぎない。これは、方向スペクトルの観測成果の蓄積が十分でないことが最大の要因となっている。

このような背景のもとに、比較的水深の大きい海域に対する波浪観測技術の開発が進められ、近年になって、いわき沖で定常観測を開始するようになった。また、海洋波の方向スペクトルについても、精度良く推定することが可能になってきた。そこで、本論文では深海域(水深  $h = -154\text{m}$ )のいわき沖観測地点で取得された観測データにもとづき、沖波の方向スペクトルの出現特性を明らかにし、要因となる気象擾乱ごとに整理して検討を加えた。

一般に、方向スペクトル解析を行う場合には海底地形等の影響を受けにくい沖波を対象とする必要がある。ところが、その妥当性について検討された例は少ない。そこで、小名浜港における沿岸域の波浪の出現特性といわき沖の沖波としてのそれとの相違点に着目して比較検討した。

なお、本論文では主に多方向系の方向スペクトルの出現特性について論じている。そのため、限られた少数のパラメータを用いて議論することは妥当でないとの判断から、方向スペクトル関数としては特別な関数形を与えずに解析を進めている。

今回の研究により得られた主要な結論は次に示すとおりである。

- (1) いわき沖の波浪観測より得られた方向スペクトル形状は1年を通して一定でなく通年的な変動特性をもつ。この特性は主となる気象要因に支配され、気象擾乱の種類とその進路によってよく説明できる。
- (2) 複数の気象要因による擾乱時の方向スペクトルはこれらに対応したピークをもつ。この場合の代表波向は、それぞれのピークのピーク値と方向集中度に支配され、ピークがそれぞれに示す波向やこれらの中央波向とは必ずしも一致しない。
- (3) 解析対象となった波浪観測結果によると、既往の沿岸域の観測結果と比べ、水位の出現分布はより正規分布に近い形状となる。しかしながら、 $1/n$ 最大波高の有義波高に対する比は、波高の確率分布を Rayleigh 分布と仮定した場合に比べ小さくなる傾向がみとめられる。
- (4) 沖合い(いわき沖)と沿岸域(小名浜港)の有義波高の間には強い相関があり、両者の月別平均有義波高の比は1.5倍前後で沖合いで得られた観測値の方が大きくなる。これに対し、両者の平均波向間の相関は弱い。これは沿岸域で観測される平均波向は海底地形により影響を受けているので、沖合いの波向に鈍感になるためである。

キーワード: 方向スペクトル, 現地観測, 波浪統計, 波候統計, 深海波, 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS)

\* 海洋水理部 海象調査研究室長  
\*\* 海洋水理部 主任研究官  
\*\*\* 海洋水理部 海象調査研究室

## 2. On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas (1st Report : The Field Observation off Iwaki)

Toshihiko NAGAI\*  
Noriaki HASHIMOTO\*\*  
Tadashi ASAI\*\*\*

### Synopsis

Directional energy distribution is one of the fundamental properties of ocean surface waves, which induces current, sedimentation and the other many phenomena. However, little knowledge of the directional wave properties has been obtained yet, for the following two reasons. First, it has been difficult to carry out the long term field observation in deep seas, where the effect of the topography can be neglected. Secondly, no reliable method has been established to estimate the accurate directional wave spectrum.

In 1986, the Second District Port Construction Bureau of the Ministry of Transport started the field observation in deep seas, at Iwaki offshore wave observation station ( $h = -154\text{m}$ ), 42km off the Pacific coast of Japan, as one of the stations of NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HAbourS). To overcome first difficulty, multiple wave gauge array is settled there by utilizing the existing offshore oil rig. And for the second difficulty, authors have proposed new methods, such as Maximum Entropy Principle (MEP) and Bayesian methods, to improve the accuracy of the directional wave spectrum estimation.

This paper describes the properties of the directional wave spectra obtained at Iwaki offshore station, including the short term and long term statistics.

Concluding remarks are as follows,

- (1) The properties of directional wave spectra at Iwaki offshore station can be well explained by the climatic state.
- (2) Multiple peaks appear in the estimates of directional wave spectra under the simultaneous occurrence of complexed phenomena in weather.
- (3) The representative wave direction, such as mean direction, cannot indicate the direction of the most dominant peak in multi-directional seas, because it's also influenced by the other peaks.
- (4) Statistical values of water surface elevation off Iwaki are closer to those of normal distribution than the observation values obtained in the rather shallow area. The ratio of each reference wave height, such as  $H_{1/10}$  or  $H_{max}$ , to significant wave height is less than that assumed to the Rayleigh process.
- (5) Significant wave heights off Iwaki are proportional to those at Onahama located in the nearshore area of Iwaki offshore station. As regards the mean direction, the correlation between the offshore and the nearshore is not well, because the wave direction in nearshore area is effected more by the topography of sea bottoms.

**Key Words** : Directional wave spectrum, Field observation, Wave statistics, Wave climate, Deep-water waves, NOWPHAS

---

\* Chief, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division  
\*\* Senior Research Engineer, Marine Hydrodynamics Division  
\*\*\* Member, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

## 目 次

### 要 旨

1. ま え が き .....	49
2. 研究の目的 .....	49
3. いわき沖観測システム .....	50
3.1 観測システムの概要 .....	50
3.2 解析対象期間および解析方法 .....	53
4. いわき沖の波浪特性 .....	53
4.1 年間の変動特性 .....	53
4.2 沿岸域の波浪との関係 .....	56
5. 実測値を用いた方向スペクトル分布形状に関する考察 .....	75
5.1 方向スペクトル変動特性 .....	75
5.2 多方向系波浪の方向スペクトル特性 .....	79
5.3 気象擾乱下における方向スペクトルの変化特性 .....	80
6. ま と め .....	84
参 考 文 献 .....	105
補章 A. 方向スペクトルの推定方法とその特性 .....	106

## 1. まえがき

海洋波の特性を解明することは重要な研究課題の1つであり、現在までに現地観測にもとづく数多くの研究成果が発表されている。当研究室においても、1970年に運輸省港湾局とその関係機関の協力のもとに、統一的技術基準に則した集中処理を目的として全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) による波浪観測網を開始した。以来、海洋波の特性についての研究に積極的に取り組んでおり、各年の年報<sup>1)~6)</sup>や長期統計報<sup>7)</sup>を通して各種波浪統計諸元のとりまとめを行っている。これらは主として各港湾に來襲する波浪の特性を明らかにすることを目的としているため、水深  $h = -20 \sim -50 \text{ m}$  の地点における波浪諸元を取得し、浅海変形等による影響を考慮した解析を行っている。このため、沖波の本質的な特性の1つである多方向性の議論をする場合には、波浪変形を受けた浅海域の波浪情報では解析が困難となる。したがって、現実の多様な沖波の方向スペクトルの出現特性はいまだ十分に把握されておらず、設計等においても方向集中度パラメータなどを用いて便宜的に方向スペクトルを与えているにすぎない。

一方、港湾開発は今後ますます大規模化・大水深化する傾向にあり、その計画・設計・施工のいずれの分野においても波浪に関する正確で総合的な情報をとらえることが重要になっている。このような観点から、現在用いられている有義波諸元に加えて、波浪を総合的に記述する方向スペクトルの検討が今後必要とされるものと思われる。

このような背景をもとに、従来では困難であった深水域での波浪観測技術の開発が進められ、近年、実際にいくつかの地点で観測が実施されるようになった<sup>8)~10)</sup>。そこで、本論文では深水域に設置された観測施設により取得された観測データにもとづき、深水域の方向スペクトルの出現特性を把握し、深水域と沿岸域の波浪の出現特性の相違点について検討を加えることとした。

## 2. 研究の目的

現地観測で得られた方向スペクトルを標準化するため種々の方向分布関数を用いられている (関数形については補章Aを参照のこと)。これらの関数の多くは波エネルギーの來襲する代表的な方向とエネルギーの方向集中度との2つのパラメータにより特定され、これらとパワースペクトルを組み合わせることによって方向スペクトルが表現される。これらの2つのパラメータはそれぞれ波向代表量とその分散に対応する量であり、両者の関

係についてはこれまでにいくつもの研究が行われている。したがって、既往の方向分布関数を用いて方向スペクトルを推定する場合には波向代表量の知識を活用できる長所がある反面、表現できる情報量に制限がある。

さらに、いままでに提案された方向分布関数の向定の際には、気象要因がはっきりした単一擾乱下の波浪を対象とすることによって、議論を簡便にし、因果関係を明確にしている。このため、フェッチ等が確定できる風波を対象として解析を行っている。そして、気象条件以外による影響を極力無視できるような地形条件等を選定し観測および解析を行っていることに注意する必要がある。また、沿岸域で観測される方向スペクトルは、屈折等の影響により、方向分布関数の非対称性が無視できる程度まで方向集中度が増大する。複数の波浪系の重ね合わせからなる方向スペクトルについても、判別が困難な程度までピークが近接してくるため、1つの方向スペクトルとしてまとめて取り扱えるようになる。このため、沿岸域の方向スペクトルは従来の方向関数を用いても比較的良好に表現できる。これに対し、深水域で観測される方向スペクトルは、一般にいくつかの波浪系の重ね合わせからなり、既往の標準形をそのまま当てはめるには問題がある。この解決法として既往の方向関数をいくつか重ね合わせる方法もあるが、この場合には、重ね合わせる波浪系の数とそれぞれの方向関数の方向集中度との間に任意性があり、一意的な表現には若干の問題が残されている。また、地形的な条件から遮蔽の影響を受ける地点については方向スペクトルに局所的な変化がみられる可能性があり、現行の方向分布関数では必ずしもこれらの影響を完全に表現できるとはいえない。いずれにしても、沿岸域で観測された方向スペクトルから深水域の多方向性のスペクトルを逆推定することは未だ困難であり、沖波の方向スペクトルの出現特性を把握するためには直接的に深海域で観測された方向スペクトルを用いて解析する必要がある。

沿岸波浪とくに周波数スペクトルの特性の解明については数多くの研究がこれまでになされている。例えば、合田・永井<sup>11)</sup>は名古屋港をはじめとする沿岸海域の数地点で長期間観測されたデータに対し詳細な解析を行っており、また、山口・土屋<sup>12)</sup>は、琵琶湖上の風波の観測データを用いた検討を行っている。それに対し、波浪の多方向性を含む詳細な波浪情報、とくに沖波の方向スペクトルの出現特性については今なおほとんど把握されておらず、既往の方向関数を用いた少数のパラメータによる把握は、現段階では適当ではない。そこで、本論文では、ノンパラメトリックな推定方法であるベイズ型モ

デル (BDM)<sup>13)</sup>を用いて方向スペクトルを推定した。そして、より一般的な方向スペクトルの出現特性を把握する研究の第一段階として、とくに標準形にはこだわらず、推定値をそのまま適用することにより、いわき沖に出現する方向スペクトルの季節的な傾向や特定期間内のエネルギーの分布特性等の多様な出現特性について検討することとした。

### 3. いわき沖波浪観測システム

#### 3.1 観測システムの概要

いわき沖波浪観測システム (以後、いわき沖と呼ぶ) は、運輸省第二港湾建設局が1986年10月に完成させた波浪観測システムである。いわき沖の観測局は図-1に示すように塩屋崎灯台の北東約54km (北緯37°17'49", 東経141°27'47") の水深  $h = -154\text{m}$  の地点に位置しており、天然ガス開発用のプラットフォームの脚を利用して、従来では困難とされてきた沖波の波浪観測を実施している。観測局では、波浪観測機器として4台のステップ式波高計および水圧式波高計の装備された超音波式の水平2成分流速計が設置されており、最大7成分の観測データを取得することができる。これらの観測機器の取

り付け位置は、それぞれ図-2、図-3および表-1に示すとおりである。

観測局で取得された観測データは、観測局から42km離れた広野火力中継局に無線テレメータにより送信される。さらに、広野火力中継局からは有線テレメータを経由して小名浜港工事事務所にある監視局へ送られる。小名浜港工事事務所の監視局では、ミニ・コンピュータを利用して種々のデータ処理が実施され、風や波浪に関する情報がリアルタイムで自動出力されている。

いわき沖波浪観測システムの観測項目は、波高、周期、波向、流向、流速、風向および風速であり、これらは毎偶数時に取得されている。各観測項目の解析は、波浪諸元については毎偶数正時前後の10分間の計20分間に取得された観測データを用いて実施しており、流向流速は正時前後の1分間の計2分間、風速および風向は正時前の10分間の観測データを使用している。これらの観測データは、それぞれステップ式波高計、水圧式波高計の装備された超音波式の水平2成分流速計およびプロペラ式風向風速計を用いて取得されている。これらの観測機器の仕様は表-2に示すとおりである。

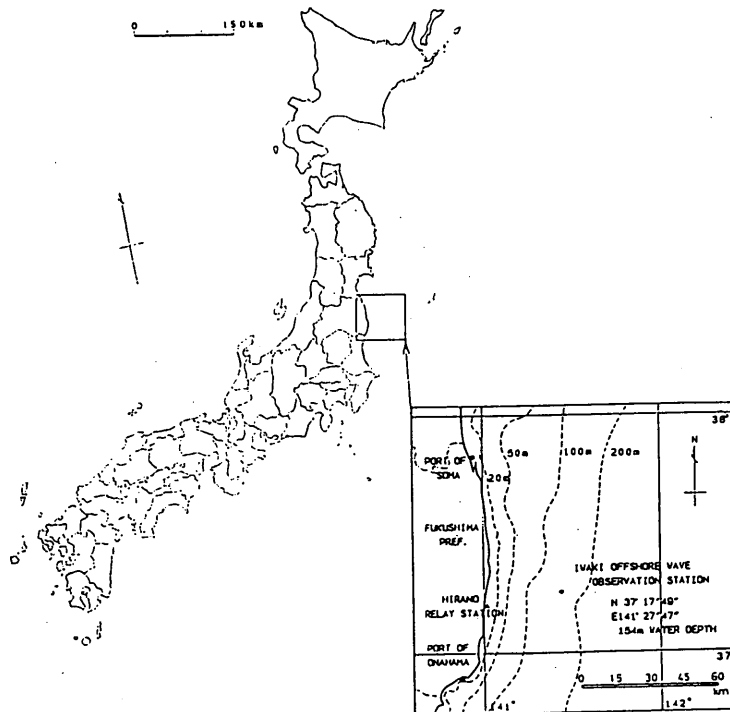


図-1 いわき沖位置図

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

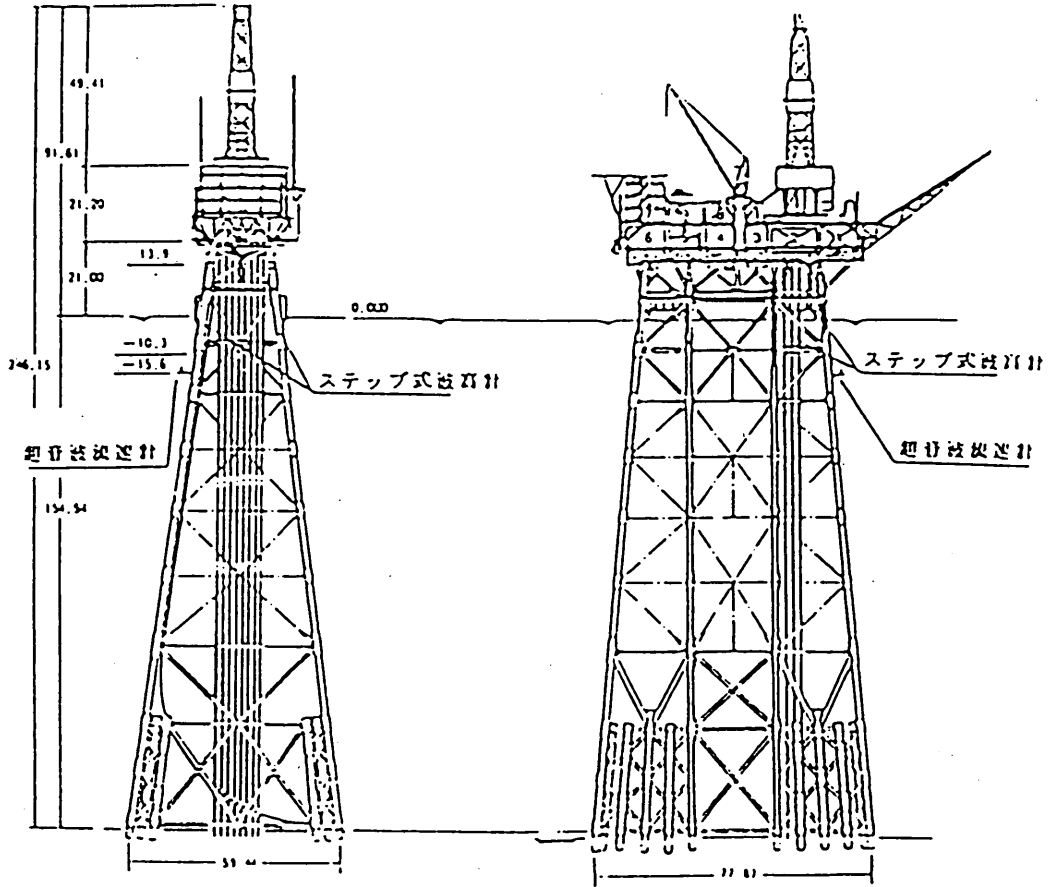


図-2 観測局の外観および観測機器の取付位置

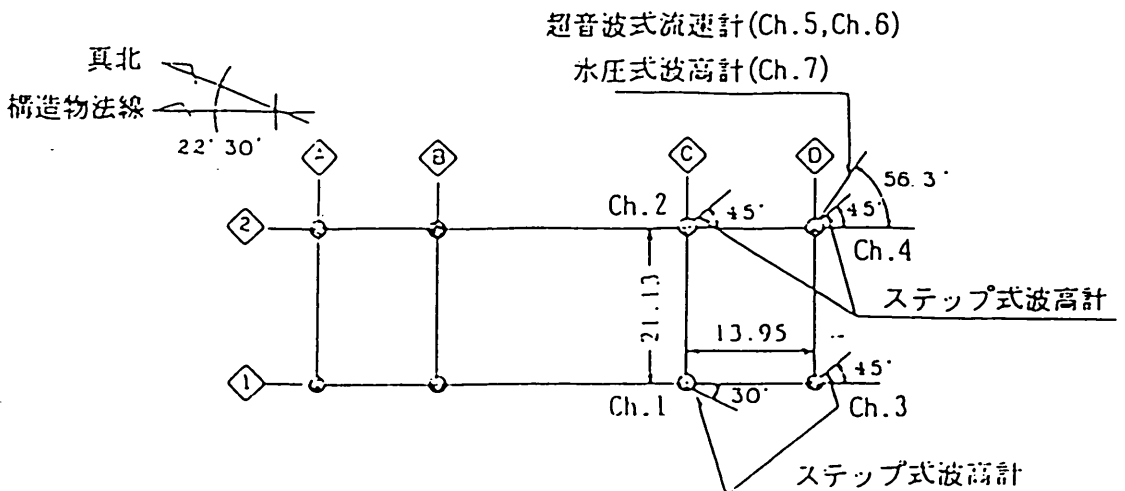


図-3 観測機器の取付平面図

(図中の●印は観測局プラットフォームの橋脚を表す)



表-1 波浪観測機器の取り付け位置 (相対座標)

Channel 番、号	観測波動量	観測機器	設置位置		設置水深 (m)
			x座標 (m)	y座標 (m)	
ch. 1	$\eta$	ステップ式波高計	-25.137	2.701	
ch. 2	"	"	-3.255	12.055	
ch. 3	"	"	-17.509	-8.870	
ch. 4	"	"	2.039	-0.853	
ch. 5	u	超音波式流速計	7.826	-1.578	-14.530
ch. 6	v	"	"	"	"
ch. 7	p	水圧式波高計	"	"	-14.830

表-2 波浪観測機器の仕様

	波高計	流速計	風向風速計
機種	ステップ式波高計 (SR-V)	超音波式流速計 (TP-21A)	プロペラ型 風向風速計
測定範囲	-10.3~+13.9m 波高桿長 約24.5m センサー点数 252点	成分流速 0~±3m/s 水圧変動 0~±0.5kgf/cm <sup>2</sup>	風速 2~60m/s
測定精度	10cm±5cm	流速 ±4% 流向 ±5°	風速 10m/s以下±0.5m/s 10m/s以上±5% 風向 ±5°

### 3.2 解析対象期間および解析方法

本論文で対象とした方向スペクトルの解析対象期間は1989年1月1日～1990年12月31日の2年間とした。データの取得は、毎偶数正時前後10分間の計20分間実施し、0.5秒間隔のサンプリングでA/D変換を行っている。

方向スペクトルの推定はBDMを用いて、取得された最大7成分のデータに対して解析を行った。このモデルを用いる場合、方向スペクトル推定を行うときにスペクトル形状として特別な関数形を仮定する必要がない。このため、見かけ上のピークの発生やピークの分裂が起こりにくい。解析に用いた7成分のデータの仕様は、先に示した表-1、表-2による。

また、沿岸域の有義波諸元との比較を行うために、ゼロアップ・クロス法により有義波解析を実施した。平均波向等の代表波向の計算には共分散法(補章Aを参照)を用いている<sup>10)</sup>。

## 4. いわき沖の波浪特性

### 4.1 年間の変動特性

#### (1) 解析対象期間の気象特性

本研究の解析対象期間は、2年とも全国的に比較的波高の大きな年であった。この期間内にいくつかの特異的な擾乱が観測されており、地点によっては既往最大有義波高を大幅に更新したところもみられた。しかし、年間を通した有義波の変動特性は前後する年と全体的にほぼ同じ傾向を示している。また、対象海域でみられる典型的な気象要因による擾乱もほぼ網羅しているので、この2年間のデータから年間の変動特性をとらえられるものと判断した。この期間内の主要な気象擾乱は、表-3に示すとおりである<sup>11), 5)</sup>。

#### (2) 解析資料の統計的特性

解析対象期間内の水位変動の歪み度と尖鋭度、代表波高比および代表周期比は表-4にまとめたとおりである。表中の数字は全観測記録に対する平均値であり、かっこ内に標準偏差を併記している。また、比較のために、理論値と既往の解析結果の1例も併せて表中に示している。理論値は波高分布をRayleigh分布として計算した値であり、最高波については1/100最大波に対応する値を用いた。既往の解析結果としては合田・永井<sup>12)</sup>がいくつかの実海域における観測結果を解析した値を用いた。ここで、海洋波の水位の出現分布に対する統計的な解析手法は、Rayleighによる方法<sup>13)</sup>にしたがっている。この方法では狭帯域スペクトルの波の入射を仮定しており、水位の変動はガウシアン<sup>14)</sup>の確率過程に支配される。これから、波高の出現分布について、連続する極大値と極小

値の振幅の和として波高を定義することにより確率分布を理論的に誘導することができる。これから導かれる確率分布はRayleigh分布と呼ばれ、式(1)に示すとおりである。

$$P(x) = 2a^2 x \exp(-a^2 x^2) \quad (1)$$

ここで、

$$x = H/H_0$$

$$a = H_0 / (8m_0)^{1/2}$$

$$= \begin{cases} 1/2\sqrt{2} & : H_0 = m_0^{1/2} = \eta_{rms} \\ \sqrt{\pi}/2 & : H_0 = \bar{H} \\ 1 & : H_0 = H_{rms} \end{cases}$$

ただし、 $x$ 、 $a$ ：それぞれRayleigh分布の正規化された変数および形状母数、 $H_0$ ：任意の基準波高である。

今回の観測結果から、水位の出現分布は合田・永井によるものと比べて正規分布に比較的近い形状を示すことがわかる。これは、通常の波浪観測が行われている水域では非線形性の影響から水位波形が上下の非対称性をもつようになり、波峰が尖り波谷が平らな波形をとるためであると考えられる。また、実際の波では砕波などの条件から水位の値が無限大になることは困難であり一定の上限をもつ。そのため、水深の浅い地点では、水位の出現分布が正規分布と比べ正の方向に歪み、全体的に平均水面付近でとがった形状となっている。

それぞれの代表波高の比を比較すると、今回の観測結果は全体的に理論値より小さい。これに対し、合田・永井の観測値はRayleigh分布による値と比較的よく一致している。この傾向について、図-4に示す有義波高の頻度分布を用いて検討を行った。これより、今回の解析結果では有義波高が小さい分布の確率密度が比較的小さく、波高の頻度分布が比較的偏った形状を示していることが読み取れる。そのため、平均値と1/3最大値等の統計諸元の間隔が狭まっていると考えられる。頻度分布の形状に偏りがみられる原因としては、観測対象海域では全方向からの波浪の来襲を受けるため、かなり広範囲にわたる区域の波浪の影響を受けているためと考えられる。そのため、ほぼ常に何らかの気象擾乱の影響を受けることとなり、有義波高が低下することがあまりみられなくなる。また、いわき沖で取得されるデータには、複数の波浪系が混在する場合が多く認められる。そのような場合には狭帯域の仮定が満足されなくなるので、頻度分布がRayleigh分布と異なる形状を示すことも

考えられる。

代表周期の比については、表-4に示すように  $T_{1/10}/T_{1/3}$  および  $T_{\max}/T_{1/3}$  はともに1.0~1.1程度であり、明確な差異が認められない。これに対して、 $T_{1/3}/T_{\max}$  は、1.2程度と大きめの値をとるが、分散も大きいので実際には差異がないとみた方がよいのかもしれない。合田・永井は解析対象とした代表周期の間にはあまり強い相関が得られなかったことを述べている。代表周期の比の値は、 $T_{1/10}/T_{1/3}$ 、 $T_{\max}/T_{1/3}$  および  $T_{1/3}/T_{\max}$  ともに1.0~1.1程度である。分散がかなり大きいので、いわき沖の場合と同様に、代表周期比同士は互いに明確な差がないとみなされる。

### (3) 有義波諸元と平均波向の変動特性

表-5は対象期間内の有義波高と有義波周期の結合頻度分布を月ごとにまとめたものである。表中の縦軸、横軸はそれぞれ有義波高および有義波周期を示しており、表中の数字はそれぞれの階級値に対する出現頻度を示している。また、表上にかかれたコンター図は等確率密度線を表している。 $H/L = 0.02 \sim 0.05$ 程度程度の波浪の来襲が1年を通して最も多い。しかしながら、有義波高が比較的小さくても周期が大きい領域における波浪の出現も無視できない。このことは、うねり性の波浪の来襲があることを示しており、この領域の波浪の発生は12~2月および8月に比較的顕著である。これは、各期間においてそれぞれ冬型気圧配置および8月中旬からの台風接近による土用波に起因する比較的周期の長い波浪が単独で観測されるためである。その他の期間に発生するうねり性の波浪には風波が混在している場合が多いため、有

義波周期の値として計算された値の上では顕著な傾向がみられない。また、対象海域では1年を通して有義波高の大きな波浪が取得されているが、5~7月には大きな気象擾乱の発生が比較的少ないため結合頻度分布形も波高の小さい領域に集中している。このように波浪の出現頻度の分布形状は要因となる気象擾乱の影響を受ける。結合頻度分布形状に与えるこの影響については波向も含めて次項以降で検討することにする。

表-6、表-7はそれぞれ有義波高および有義波周期と平均波向の結合頻度分布を月ごとにまとめて示している。表-6の縦軸は有義波高の階級値を示しており、表-7の縦軸は有義波周期の階級値である。両図とも、横軸は平均波向の階級値を示している。表中の数字はそれぞれの階級値に対する出現頻度を示している。また、表上にかかれたコンター図は等確率密度線を表している。12~2月には、冬型気圧配置が発達し長期間安定した状態となるために比較的有義波高および周期がどちらも大きな波浪が発達する。ただし、対象海域では背後の地形的による影響からN~NEにかけての風が発達するために、平均波向はN~NEを中心に分布する。また、時折日本海低気圧の通過がみられるため、これに対応したE~SEの波浪も発生している。8~12月始めは台風の来襲する季節であり、台風の挙動に対応した波向が出現している。例えば、8~9月始めにかけては沖縄や九州方面を台風が通過するために、対象海域ではよく発達したうねり性の波浪がS周辺から来襲することとなる。これに対し、それ以後の期間では台風が対象海域近辺を通過するようになるので、台風中心へ吹き込む風に

表-3 1989年~1990年の主要な気象攪擾

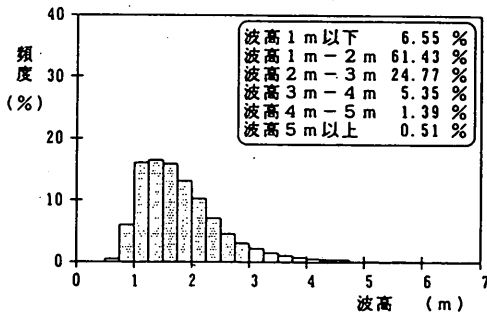
擾乱の期間	主な気象要因	高波出現海域
1989年1月21日~1月25日	南岸低気圧および冬型気圧配置	ほぼ全国沿岸
1989年3月20日~3月25日	冬型気圧配置および二つ玉低気圧	太平洋沿岸および日本海沿岸の一部
1989年8月26日~8月28日	台風8917号	太平洋沿岸および日本海沿岸の一部
1989年10月31日~11月3日	二つ玉低気圧および冬型気圧配置	ほぼ全国の沿岸
1989年11月18日~11月21日	冬型気圧配置	日本海沿岸および太平洋沿岸の一部
1990年3月11日~3月14日	日本海低気圧および冬型気圧配置	九州から南西諸島を除くほぼ全国沿岸
1990年9月16日~9月21日	台風9019号	ほぼ全国沿岸
1990年11月9日~11月13日	日本海低気圧および冬型気圧配置	紀伊半島から南西諸島の太平洋側を除く全国沿岸
1990年11月28日~12月5日	台風9028号および台風9028号崩れの低気圧	全国沿岸
1990年12月26日~12月30日	日本海低気圧および冬型気圧配置	日本海沿岸全域

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
— いわき沖の観測結果 —

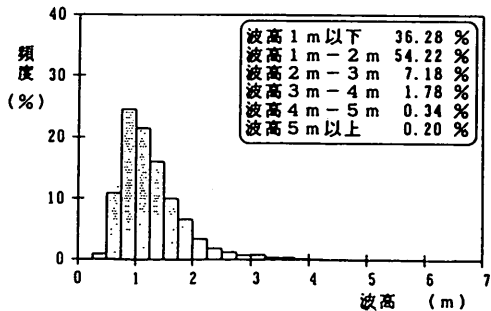
表-4 いわき沖における波浪代表諸元の値

	理論値	観測値(いわき沖)	観測値(沿岸域)
歪み度	0.000	0.074 ( 0.096 )	0.467 ( 0.291 )
尖鋭度	3.000	2.994 ( 0.189 )	3.74 ( 0.67 )
$H_{1/2} / m_0^{1/2}$	4.004	3.726 ( 0.167 )	3.97 ( 0.18 )
$H_{1/2} / H_{max}$	1.597	1.513 ( 0.057 )	1.588 ( 0.064 )
$H_{1/10} / H_{1/2}$	1.271	1.224 ( 0.041 )	1.274 ( 0.056 )
$H_{max} / H_{1/2}$	1.667	1.507 ( 0.154 )	1.653 ( 0.262 )
$T_{1/2} / T_{max}$	-----	1.207 ( 0.104 )	1.139 ( 0.112 )
$T_{1/10} / T_{1/2}$	-----	1.046 ( 0.190 )	1.006 ( 0.052 )
$T_{max} / T_{1/2}$	-----	1.039 ( 0.077 )	0.999 ( 0.131 )

※ 沿岸域の観測値は、合田ら(1974)による値を用いている



(1) いわき沖



(2) 小名浜

図-4 有義波高の出現頻度

対応してN~Eの波浪も発生する。3月および4月には数日程度の周期性をもって移動性の低気圧が黄海および東シナ海で発生し日本を通過していくため、これらによる風場に対応した波浪が発生し非常に複雑な分布形状になる。しかしながら、3月の結合分布表は4月のものと比べて波向の出現頻度がEに集中しており、この傾向は有義波周期の分布により顕著に現れている。これは3月の波浪を特徴づける気象要因のうち、ある特定の気象擾乱がとくに平均波向を計算する上で支配的になっているためであると考えられる。前項でも示したとおり5~7月に発生する波浪は比較的有義波高の小さな波浪が多く、平均波向も特別な傾向はなく、NNE~Sにかけて幅広く分布している。

上記から波浪統計諸元の特性は主として気象要因によって支配されることが明らかとなった。しかしながら、いくつかの気象要因が同時にみられる場合には、互いに影響を及ぼし合うために個々の特性が不明瞭となったり、あるいはどれか1つの気象要因が支配的となって他の影響を読み取れないことが起こりうることもわかった。したがって、波浪統計諸元、とくに平均波向を用いて波候特性を議論する場合には注意して行う必要がある。そこで、気象要因と波浪統計諸元の関係を、波浪統計諸元を用いてどの程度説明できるかという観点から、あらためて4.1(4)にまとめることとする。



沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

表-5(1): 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (1月)

1月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0(s)	TOTAL	
(m) ~12.00	単位 (%)																		0.0
12.00~11.00	H/L=0.1																		0.0
11.00~10.00	0.09																		0.0
10.00~9.00	0.08																		0.0
9.00~8.00	0.07																		0.0
8.00~7.00	0.06																		0.0
7.00~6.50	0.05																		0.1
6.50~6.00	0.04																		0.4
6.00~5.50	0.03																		0.1
5.50~5.00	0.02																		1.1
5.00~4.50	0.01																		0.4
4.50~4.00	0.005																		0.8
4.00~3.00	0.3 0.3 0.3 0.6 0.1																		1.5
3.00~2.50	0.4 1.9 1.4 2.2 1.5 1.7 0.4																		9.5
2.50~2.00	0.3 1.1 3.2 2.0 0.8 1.0 0.6																		9.8
2.00~1.75	0.4 1.4 2.4 1.2 0.8 1.9 0.3																		14.5
1.75~1.50	0.3 1.1 2.6 2.0 0.8 0.3 0.3																		8.7
1.50~1.25	0.3 1.1 2.5 2.6 3.0 0.1 0.1 0.3 0.1																		15.1
1.25~1.00	0.2 1.1 2.6 2.2 2.3 0.3 0.6 0.4 0.4																		18.2
1.00~0.75	0.2 0.4 0.3 0.6 0.8 1.4 0.3 0.3																		14.2
0.75~0.50	0.1 0.1 0.1 0.1 0.1																		4.7
0.50~0.25	0.1 0.1 0.1 0.1 0.1																		0.7
0.25~	0.1 0.1 0.1 0.1 0.1																		0.0
TOTAL	0.0	0.1	4.0	14.6	19.1	18.5	15.6	13.5	6.5	5.9	1.5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	

表-5(2) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (2月)

2月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0(s)	TOTAL	
(m) ~12.00	単位 (%)																		0.0
12.00~11.00	H/L=0.1																		0.0
11.00~10.00	0.09																		0.0
10.00~9.00	0.08																		0.0
9.00~8.00	0.07																		0.0
8.00~7.00	0.06																		0.0
7.00~6.50	0.05																		0.0
6.50~6.00	0.04																		0.2
6.00~5.50	0.03																		0.0
5.50~5.00	0.02																		0.3
5.00~4.50	0.01																		1.5
4.50~4.00	0.005																		1.2
4.00~3.00	0.2 0.2 0.2 0.3 0.6																		1.7
3.00~2.50	0.2 0.2 0.3 0.6																		8.1
2.50~2.00	0.3 1.8 2.0 0.8 1.7 0.8																		14.9
2.00~1.75	0.3 1.8 2.0 0.8 1.7 0.8																		20.7
1.75~1.50	0.3 1.8 2.0 0.8 1.7 0.8																		13.7
1.50~1.25	0.3 1.8 2.0 0.8 1.7 0.8																		18.2
1.25~1.00	0.3 1.8 2.0 0.8 1.7 0.8																		15.2
1.00~0.75	0.2 0.2 0.3 0.6																		2.9
0.75~0.50	0.2 0.2 0.3 0.6																		1.7
0.50~0.25	0.2 0.2 0.3 0.6																		0.0
0.25~	0.2 0.2 0.3 0.6																		0.0
TOTAL	0.0	0.0	1.8	3.9	14.1	21.5	23.9	21.0	8.6	3.5	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	

表-5(3) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (3月)

3月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

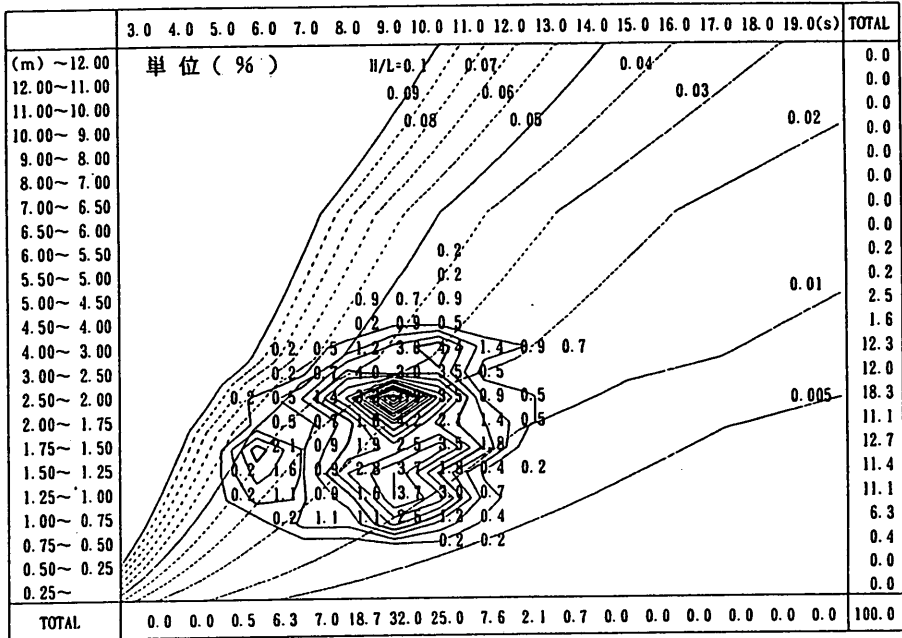
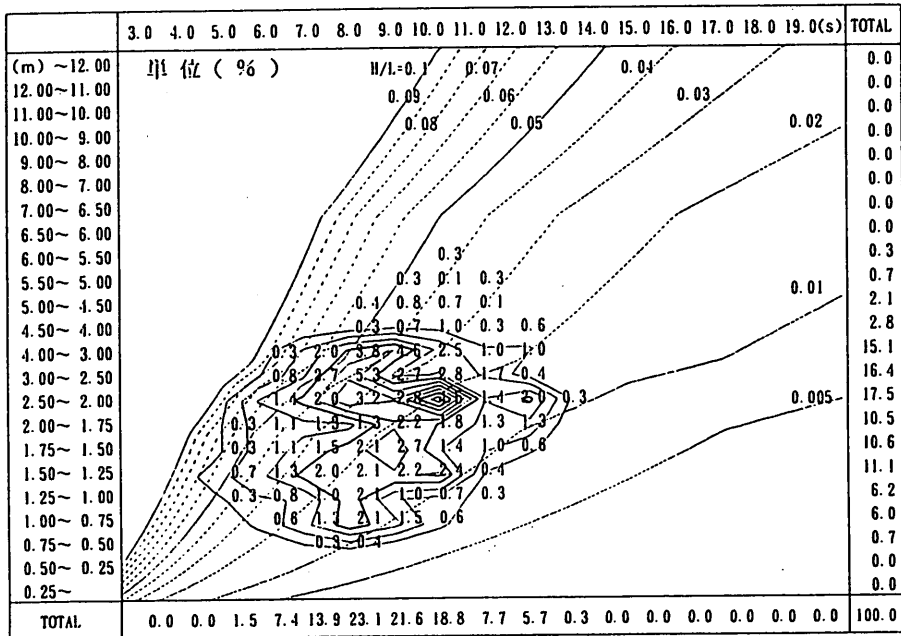


表-5(4) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (4月)

4月 有義波高・有義波周期 出現頻度表



沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

表-5(5) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (5月)

5月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

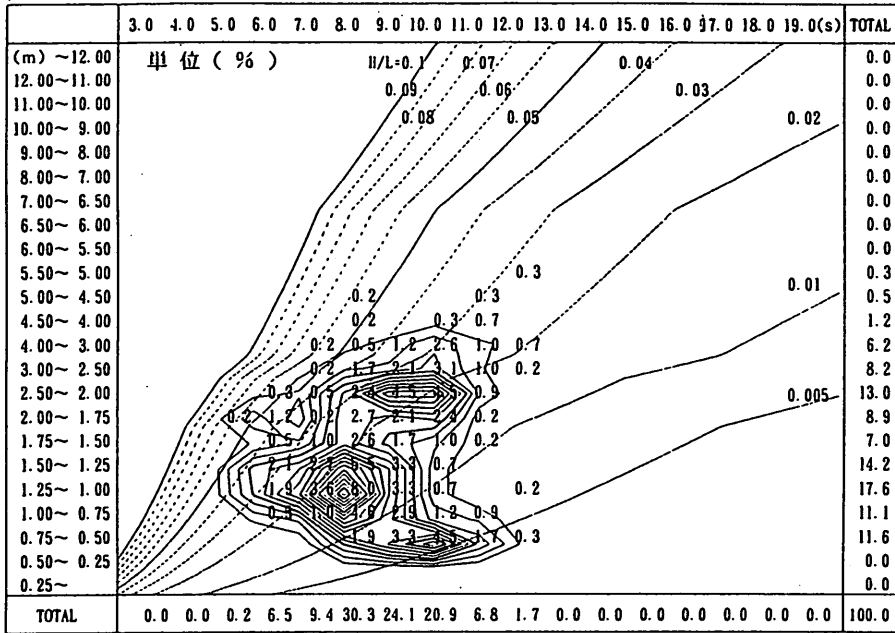


表-5(6) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (6月)

6月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

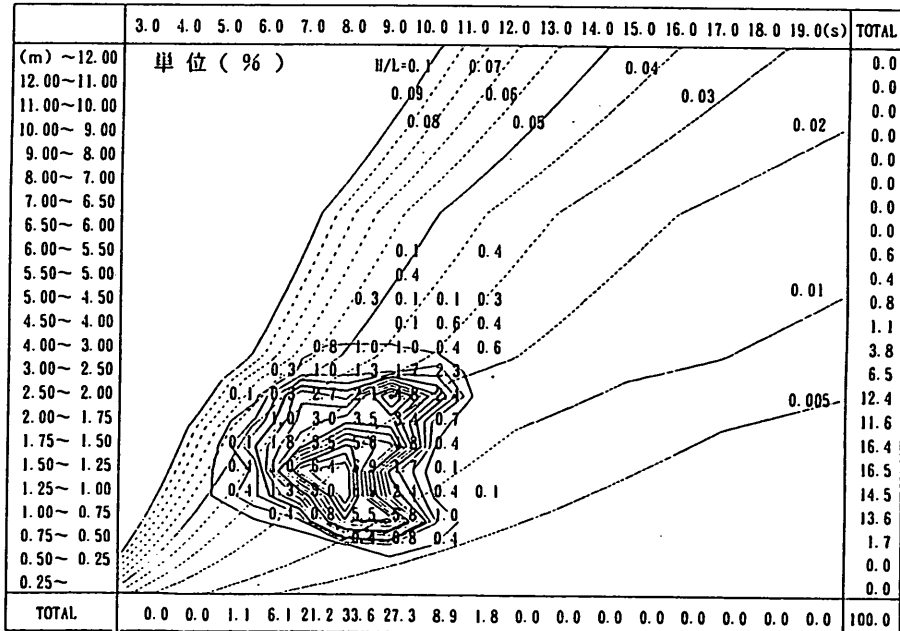




表-5(7) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (7月)

7月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0(s)	TOTAL	
(m) ~12.00	単位 (%)																		0.0
12.00~11.00	H/L=0.1																		0.0
11.00~10.00	0.07																		0.0
10.00~9.00	0.09																		0.0
9.00~8.00	0.08																		0.0
8.00~7.00	0.06																		0.0
7.00~6.50	0.05																		0.0
6.50~6.00	0.04																		0.0
6.00~5.50	0.03																		0.0
5.50~5.00	0.02																		0.0
5.00~4.50	0.01																		0.0
4.50~4.00	0.005																		0.0
4.00~3.00	0.1	1.1	1.1	0.4	0.5														2.2
3.00~2.50	0.4	1.0	1.0	0.4	0.1														4.7
2.50~2.00	0.1	0.2	0.2	0.5	0.7														15.0
2.00~1.75	0.2	0.2	0.2	0.8	0.1														11.3
1.75~1.50	0.2	0.2	0.2	0.8	0.1														13.6
1.50~1.25	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1														20.3
1.25~1.00	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1														22.0
1.00~0.75	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1														10.3
0.75~0.50	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1														0.7
0.50~0.25	0.4	0.3																	0.0
0.25~																			0.0
TOTAL	0.0	0.0	1.6	5.2	21.2	37.6	25.3	7.1	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

表-5(8) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (8月)

8月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0(s)	TOTAL	
(m) ~12.00	単位 (%)																		0.0
12.00~11.00	H/L=0.1																		0.0
11.00~10.00	0.07																		0.0
10.00~9.00	0.09																		0.0
9.00~8.00	0.08																		0.5
8.00~7.00	0.06																		0.0
7.00~6.50	0.05																		0.2
6.50~6.00	0.04																		0.0
6.00~5.50	0.03																		0.2
5.50~5.00	0.02																		0.4
5.00~4.50	0.01																		0.2
4.50~4.00	0.005																		0.9
4.00~3.00	0.2	1.1	0.7	0.4	0.4														1.2
3.00~2.50	0.4	0.5	0.7	1.1	0.9	0.9													2.6
2.50~2.00	0.5	1.1	1.8	1.2	1.4	1.6	0.2												5.3
2.00~1.75	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.2												10.2
1.75~1.50	0.2	0.9	0.9	0.9	1.2	0.5													17.7
1.50~1.25	0.2	0.9	0.9	0.9	1.2	0.5													9.6
1.25~1.00	1.8	1.8	1.8	1.8	0.7														19.3
1.00~0.75	1.8	1.8	1.8	1.8	0.7														19.3
0.75~0.50	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2														6.1
0.50~0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2														4.7
0.25~																			0.7
TOTAL	0.0	0.0	0.4	7.9	9.8	21.2	25.6	18.9	8.6	5.6	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

表-5(9) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (9月)

9月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

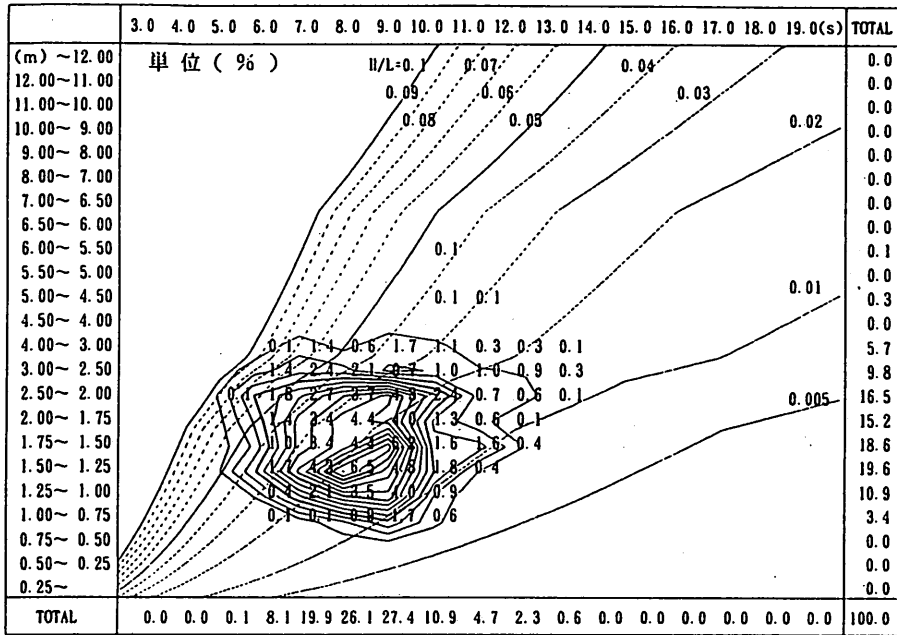


表-5(10) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (10月)

10月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

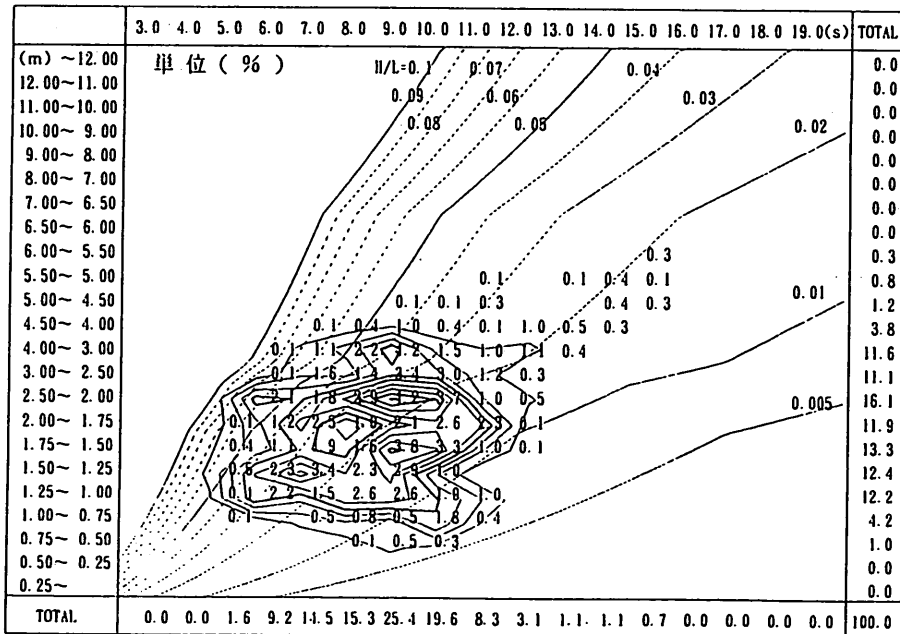


表-5(11) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (11月)

11月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0(s)	TOTAL	
(m) ~12.00	単位 (%)																		0.0
12.00~11.00	H/L=0.1																		0.0
11.00~10.00	0.07																		0.0
10.00~9.00	0.09																		0.0
9.00~8.00	0.08																		0.0
8.00~7.00	0.06																		0.0
7.00~6.50	0.05																		0.0
6.50~6.00	0.04																		0.0
6.00~5.50	0.2																		0.2
5.50~5.00	0.2 0.5 0.7 0.5																		0.0
5.00~4.50	0.5 0.9 0.9 0.7																		1.8
4.50~4.00	0.2																		2.9
4.00~3.00	0.2 0.2 0.7 1.1 0.9																		2.3
3.00~2.50	0.2 1.6 1.8 2.5 2.4 0.9																		3.2
2.50~2.00	0.2 2.0 2.4 3.0 2.4 0.9																		9.5
2.00~1.75	0.1 1.1 2.0 2.4 3.0 2.4 0.9																		13.3
1.75~1.50	0.2 1.1 1.6 2.3 2.4 1.1 0.2 0.2																		16.1
1.50~1.25	0.2 1.8 2.3 1.6 1.4 3.2 0.7 0.7																		8.8
1.25~1.00	0.2 1.6 1.0 2.3 2.2 2.1 2.0 0.9 0.7 1.1																		14.7
1.00~0.75	0.1 0.9 0.7 2.3 2.2 0.7 0.5																		16.3
0.75~0.50	0.2 0.7 0.5 0.5 0.7																		8.1
0.50~0.25	0.2																		2.5
0.25~	0.005																		0.2
TOTAL	0.0	0.0	2.3	8.1	12.0	16.7	21.5	18.1	11.5	5.4	2.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	

表-5(12) 有義波高と有義波周期の結合頻度分布 (12月)

12月 有義波高・有義波周期 出現頻度表

	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0(s)	TOTAL	
(m) ~12.00	単位 (%)																		0.0
12.00~11.00	H/L=0.1																		0.0
11.00~10.00	0.07																		0.0
10.00~9.00	0.09																		0.0
9.00~8.00	0.08																		0.0
8.00~7.00	0.06																		0.1
7.00~6.50	0.05																		0.3
6.50~6.00	0.04																		0.1
6.00~5.50	0.1																		0.6
5.50~5.00	0.1 0.1 0.1 0.1																		0.6
5.00~4.50	0.3 0.3																		0.9
4.50~4.00	0.1 0.1 0.1 0.3 0.1																		1.5
4.00~3.00	0.3 0.4 0.1																		9.6
3.00~2.50	0.1 0.4 0.9 0.9 2.2 1.0 1.8 1.9 0.4																		12.6
2.50~2.00	0.3 0.4 2.3 2.8 2.9 1.3 1.0 1.9																		15.8
2.00~1.75	1.6 2.0 1.6 2.2 2.2 2.4 3.8 1.0 0.6																		8.5
1.75~1.50	1.6 2.0 1.6 2.2 2.2 2.4 3.8 1.0 0.6																		10.8
1.50~1.25	0.3 0.3 1.8 1.8 1.0 0.4 0.1																		14.5
1.25~1.00	0.1 0.3 3.4 3.1 2.2 1.5 1.3 0.4 0.3																		10.1
1.00~0.75	0.1 0.3 3.4 3.1 2.2 1.5 1.3 0.4 0.3																		10.1
0.75~0.50	0.1 0.3 3.4 3.1 2.2 1.5 1.3 0.4 0.3																		3.9
0.50~0.25	0.1 0.9 0.6 0.7 0.9 0.4 0.3																		0.0
0.25~	0.005																		0.0
TOTAL	0.0	0.1	7.7	17.5	13.3	15.6	14.8	11.5	8.0	6.1	4.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

表-6(1) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (1月)

1月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNV	NV	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.1
7.00~6.50																	0.3
6.50~6.00																	0.1
6.00~5.50																	1.0
5.50~5.00																	0.3
5.00~4.50																	0.9
4.50~4.00																	1.6
4.00~3.00																	10.0
3.00~2.50																	10.3
2.50~2.00																	14.9
2.00~1.75																	8.4
1.75~1.50																	14.8
1.50~1.25																	17.9
1.25~1.00																	13.4
1.00~0.75																	5.1
0.75~0.50																	0.7
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.5	23.9	33.9	17.6	10.6	8.2	3.6	0.4	0.0	0.0	0.0	100.0

表-6(2) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (2月)

2月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNV	NV	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.2
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.3
5.50~5.00																	1.6
5.00~4.50																	1.3
4.50~4.00																	1.8
4.00~3.00																	8.3
3.00~2.50																	13.6
2.50~2.00																	19.5
2.00~1.75																	13.9
1.75~1.50																	19.0
1.50~1.25																	15.9
1.25~1.00																	2.8
1.00~0.75																	1.8
0.75~0.50																	0.0
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.7	30.6	35.2	11.5	8.0	6.5	0.8	0.2	0.0	0.0	100.0

表-6(3) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (3月)

3月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.2
5.50~5.00																	0.2
5.00~4.50																	2.6
4.50~4.00																	1.7
4.00~3.00																	12.4
3.00~2.50																	11.8
2.50~2.00																	18.0
2.00~1.75																	11.2
1.75~1.50																	12.2
1.50~1.25																	11.6
1.25~1.00																	11.6
1.00~0.75																	6.2
0.75~0.50																	0.4
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	3.0	19.1	19.1	29.4	15.9	7.5	4.3	1.3	0.2	0.0	0.0	100.0

表-6(4) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (4月)

4月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.4
5.50~5.00																	0.9
5.00~4.50																	2.4
4.50~4.00																	3.2
4.00~3.00																	17.9
3.00~2.50																	14.9
2.50~2.00																	14.3
2.00~1.75																	8.2
1.75~1.50																	11.5
1.50~1.25																	11.9
1.25~1.00																	6.5
1.00~0.75																	6.9
0.75~0.50																	0.9
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	16.4	15.5	9.7	24.4	14.7	12.7	5.0	0.4	0.0	0.0	100.0

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
— いわき沖の観測結果 —

表-6(5) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (5月)

5月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNV	NV	NW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位(%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.0
5.50~5.00																	0.5
5.00~4.50																	0.8
4.50~4.00																	1.9
4.00~3.00																	6.9
3.00~2.50	0.3																9.0
2.50~2.00																	12.2
2.00~1.75	0.3																5.6
1.75~1.50																	3.4
1.50~1.25																	9.5
1.25~1.00																	18.5
1.00~0.75																	15.3
0.75~0.50																	16.4
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	2.1	13.0	11.9	21.2	25.7	16.9	7.1	0.8	0.3	0.0	0.0	100.0

表-6(6) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (6月)

6月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNV	NV	NW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位(%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.5
5.50~5.00																	0.5
5.00~4.50																	0.9
4.50~4.00																	1.4
4.00~3.00																	3.1
3.00~2.50																	5.9
2.50~2.00																	13.7
2.00~1.75																	9.9
1.75~1.50																	15.1
1.50~1.25																	14.6
1.25~1.00																	14.6
1.00~0.75																	17.5
0.75~0.50																	2.4
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.7	2.4	0.7	1.9	13.7	14.4	20.3	28.5	13.4	2.4	1.4	0.2	0.0	100.0

表-6(7) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (7月)

7月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.0
5.50~5.00																	0.0
5.00~4.50																	0.0
4.50~4.00																	0.0
4.00~3.00																	2.2
3.00~2.50																	4.4
2.50~2.00																	12.4
2.00~1.75																	8.1
1.75~1.50																	9.4
1.50~1.25																	19.0
1.25~1.00																	29.2
1.00~0.75																	14.4
0.75~0.50																	1.1
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.0	0.0	13.1	17.0	29.2	25.9	11.3	0.9	0.4	0.0	0.0	100.0

表-6(8) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (8月)

8月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.6
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.2
7.00~6.50																	0.4
6.50~6.00																	0.2
6.00~5.50																	1.0
5.50~5.00																	1.4
5.00~4.50																	1.2
4.50~4.00																	2.6
4.00~3.00																	5.5
3.00~2.50																	10.1
2.50~2.00																	16.6
2.00~1.75																	10.1
1.75~1.50																	18.5
1.50~1.25																	19.3
1.25~1.00																	6.1
1.00~0.75																	5.3
0.75~0.50																	0.8
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	8.5	17.6	36.3	25.8	7.1	0.2	0.0	0.0	100.0

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

表-6(9) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (9月)

9月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNV	NV	NNV	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSV	SV	WSV	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.0
5.50~5.00																	0.2
5.00~4.50																	0.0
4.50~4.00																	0.3
4.00~3.00																	0.0
3.00~2.50																	5.8
2.50~2.00																	9.2
2.00~1.75																	16.0
1.75~1.50																	13.9
1.50~1.25																	19.1
1.25~1.00																	20.5
1.00~0.75																	11.1
0.75~0.50																	4.0
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	22.9	11.9	13.0	21.5	17.8	0.8	0.0	0.0	0.0	100.0

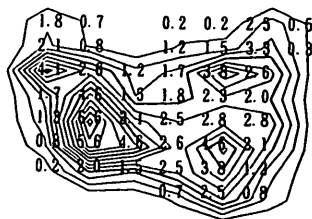


表-6(10) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (10月)

10月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNV	NV	NNV	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSV	SV	WSV	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.0
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	0.0
5.50~5.00																	0.0
5.00~4.50																	0.9
4.50~4.00																	1.1
4.00~3.00																	4.0
3.00~2.50																	11.2
2.50~2.00																	10.6
2.00~1.75																	14.8
1.75~1.50																	12.2
1.50~1.25																	13.7
1.25~1.00																	13.4
1.00~0.75																	13.1
0.75~0.50																	4.2
0.50~0.25																	0.9
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.8	5.5	26.9	29.1	21.8	7.2	6.8	0.2	0.3	0.0	0.0	100.0

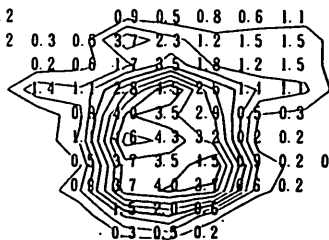




表-6(11) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (11月)

11月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NV	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	VSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.3
7.00~6.50																	0.0
6.50~6.00																	0.0
6.00~5.50																	2.1
5.50~5.00																	2.9
5.00~4.50																	0.8
4.50~4.00																	1.8
4.00~3.00																	8.9
3.00~2.50																	13.2
2.50~2.00																	15.5
2.00~1.75																	8.7
1.75~1.50																	16.6
1.50~1.25																	17.6
1.25~1.00																	8.7
1.00~0.75																	2.6
0.75~0.50																	0.3
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	20.0	31.3	29.2	7.4	3.9	0.8	0.5	0.0	0.0	100.0

表-6(12) 有義波高と平均波向の結合頻度分布 (12月)

12月 有義波高・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NV	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	VSW	TOTAL
(m) ~12.00	単位 (%)																0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	0.0
10.00~9.00																	0.0
9.00~8.00																	0.0
8.00~7.00																	0.2
7.00~6.50																	0.3
6.50~6.00																	0.2
6.00~5.50																	0.7
5.50~5.00																	0.7
5.00~4.50																	1.0
4.50~4.00																	1.2
4.00~3.00																	9.6
3.00~2.50																	13.2
2.50~2.00																	16.2
2.00~1.75																	8.6
1.75~1.50																	9.9
1.50~1.25																	12.5
1.25~1.00																	10.7
1.00~0.75																	11.2
0.75~0.50																	4.0
0.50~0.25																	0.0
0.25~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	3.0	23.9	26.1	12.4	15.0	12.0	3.1	2.1	1.0	0.5	0.0	100.0

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

表-7(1) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (1月)

1月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NV	NW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.1
14.00~13.00																	0.4
13.00~12.00																	1.6
12.00~11.00																	5.9
11.00~10.00																	6.4
10.00~9.00																	12.8
9.00~8.00																	15.1
8.00~7.00																	19.6
7.00~6.00																	18.5
6.00~5.00																	15.3
5.00~4.00																	4.0
4.00~3.00																	0.1
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.5	23.7	33.7	17.5	10.5	8.2	3.6	0.4	0.6	0.0	0.0	100.0

表-7(2) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (2月)

2月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NV	NW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.5
13.00~12.00																	1.3
12.00~11.00																	3.4
11.00~10.00																	9.3
10.00~9.00																	21.4
9.00~8.00																	24.4
8.00~7.00																	20.8
7.00~6.00																	12.9
6.00~5.00																	4.1
5.00~4.00																	1.8
4.00~3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.7	30.6	35.2	11.5	8.0	6.5	0.8	0.2	0.0	0.0	100.0

表-7(3) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (3月)

3月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	0.7
12.00~11.00																	2.1
11.00~10.00																	7.9
10.00~ 9.00																	25.1
9.00~ 8.00																	31.1
8.00~ 7.00																	19.1
7.00~ 6.00																	7.1
6.00~ 5.00																	6.4
5.00~ 4.00																	0.6
4.00~ 3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	3.0	19.1	19.1	29.4	15.9	7.5	4.3	1.3	0.2	0.0	0.0	100.0

表-7(4) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (4月)

4月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	0.0
12.00~11.00																	4.7
11.00~10.00																	8.2
10.00~ 9.00																	20.9
9.00~ 8.00																	21.4
8.00~ 7.00																	20.7
7.00~ 6.00																	14.3
6.00~ 5.00																	8.0
5.00~ 4.00																	1.9
4.00~ 3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	16.4	15.5	9.7	21.4	14.7	12.7	5.0	0.4	0.0	0.0	100.0

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

表-7(5) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (5月)

5月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	VSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	0.0
12.00~11.00																	2.4
11.00~10.00																	7.9
10.00~9.00	0.3																22.8
9.00~8.00																	23.3
8.00~7.00	0.3																26.7
7.00~6.00																	8.2
6.00~5.00																	8.5
5.00~4.00																	0.3
4.00~3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	2.1	13.0	11.9	21.2	25.7	16.9	7.1	0.8	0.3	0.0	0.0	100.0

表-7(6) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (6月)

6月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	VSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	2.4
10.00~9.00																	9.9
9.00~8.00																	26.4
8.00~7.00																	32.8
7.00~6.00																	20.0
6.00~5.00																	6.8
5.00~4.00																	1.7
4.00~3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.7	2.4	0.7	1.9	13.7	14.4	20.3	28.5	13.4	2.4	1.4	0.2	0.0	100.0

表-7(7) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (7月)

7月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	VSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	0.0
12.00~11.00																	0.0
11.00~10.00																	2.8
10.00~ 9.00																	8.9
9.00~ 8.00																	23.7
8.00~ 7.00																	35.3
7.00~ 6.00																	20.3
6.00~ 5.00																	6.3
5.00~ 4.00																	2.6
4.00~ 3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.0	0.0	13.1	17.0	29.2	25.9	11.3	0.9	0.4	0.0	0.0	100.0

表-7(8) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (8月)

8月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	VSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	2.0
12.00~11.00																	5.1
11.00~10.00																	7.7
10.00~ 9.00																	19.3
9.00~ 8.00																	26.8
8.00~ 7.00																	21.3
7.00~ 6.00																	9.5
6.00~ 5.00																	7.9
5.00~ 4.00																	0.4
4.00~ 3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	8.5	17.6	36.3	25.8	7.1	0.2	0.0	0.0	100.0

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

表-7(9) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (9月)

9月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.0
13.00~12.00																	0.0
12.00~11.00																	0.7
11.00~10.00																	2.1
10.00~9.00																	4.3
9.00~8.00																	10.7
8.00~7.00																	28.2
7.00~6.00																	24.9
6.00~5.00																	20.1
5.00~4.00																	8.7
4.00~3.00																	0.2
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	22.9	11.9	13.0	21.5	17.8	0.8	0.0	0.0	0.0	100.0

表-7(10) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (10月)

10月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	V	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 (%)																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.3
14.00~13.00																	0.9
13.00~12.00																	0.9
12.00~11.00																	3.5
11.00~10.00																	8.3
10.00~9.00																	18.9
9.00~8.00																	24.9
8.00~7.00																	14.8
7.00~6.00																	15.4
6.00~5.00																	10.2
5.00~4.00																	1.8
4.00~3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.8	5.5	26.9	29.1	21.8	7.2	6.8	0.2	0.3	0.0	0.0	100.0

表-7(11) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (11月)

11月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	Y	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 ( % )																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	2.1
13.00~12.00																	2.9
12.00~11.00																	4.5
11.00~10.00																	10.0
10.00~9.00																	18.2
9.00~8.00																	21.8
8.00~7.00																	16.6
7.00~6.00																	12.9
6.00~5.00																	8.4
5.00~4.00																	2.6
4.00~3.00																	0.0
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	20.0	31.3	29.2	7.4	3.9	0.8	0.5	0.0	0.0	100.0

表-7(12) 有義波周期と平均波向の結合頻度分布 (12月)

12月 有義波周期・平均波向 出現頻度表

	Y	VNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	TOTAL
(s) ~19.00	単位 ( % )																0.0
19.00~18.00																	0.0
18.00~17.00																	0.0
17.00~16.00																	0.0
16.00~15.00																	0.0
15.00~14.00																	0.0
14.00~13.00																	0.3
13.00~12.00																	4.6
12.00~11.00																	6.3
11.00~10.00																	7.1
10.00~9.00																	11.2
9.00~8.00																	14.7
8.00~7.00																	15.3
7.00~6.00																	12.5
6.00~5.00																	19.3
5.00~4.00																	8.4
4.00~3.00																	0.2
3.00~																	0.0
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	3.0	23.9	26.1	12.4	15.0	12.0	3.1	2.1	1.0	0.5	0.0	100.0

に対応する周波数スペクトルのピーク周波数  $f_p = 0.10 \sim 0.12 \text{ Hz}$  ( $= 1 / (1.05 T_{1/3})$ ) の深海波の群速度が  $7 \text{ m/s}$  程度であることから、どの波向についても前後2時間の間に波が到着するとしてもほぼ妥当であると判断したためである。

(2) 有義波および波向諸元の比較

図-5は、いわき沖とその沿岸域にある小名浜について、解析対象期間内の有義波高および有義波周期の月間・年間平均値を計算し、年間変動図に示したものである。外洋では陸部による遮蔽の影響が小さく、全方向から発達した波エネルギーが来襲する。このため、図中に示されるように、いわき沖では小名浜と比べて月平均のエネルギーレベルが1年を通して常に大きく、平均有義波高の値で1.35~1.65倍となっている。

しかしながら、両地点での平均有義波高の1年間の変動特性はほぼ等しく、秋季から冬季にかけての台風等の擾乱や、春季に見られる日本海低気圧や南岸低気圧によって波高が増大し、夏季には比較的小さくなる。これを詳細に検討するために、いわき沖の有義波高に対する小名浜の有義波高の相関関係を1次の回帰式を用いて表現し、月別に各係数の値を計算した。図-6に各月の相関図を示し、表-8は、各係数の値を示す。ここで、 $a, b, r$  はそれぞれ1次の係数、定数項および両地点の相関係数を表している。両地点の有義波高の相関係数は最大で0.917の値を示し、比較的相関は高い。しかしながら、この値は月によって変化し、冬季および夏季には相関が低下する傾向にある。これは、冬季において、4.1に示したように、いわき沖では冬型の気圧配置によるN~NE方向からの波浪の来襲がみられることによると考えられる。小名浜では海岸線がENE~WSW方向に広がっているために、N方向から来襲する波浪は遮蔽され、これによる有義波高はあまり大きくならない。このため、この期間、小名浜ではいわき沖との相関が小さくなり、有義波高間の1次の係数についても12月で $a = 0.483$ と小さくなる。夏季に両者の相関が小さくなるのは、有義波高が全体的に小さく、とくに小名浜では静穏に近い状態がしばしばみられるためであると考えられる。

小名浜ではSE~S(海岸線に垂直)方向から入射する波が年間を通して多く、一方、いわき沖ではNW~E~Sと幅広い方向に波向が分布している。これは、小名浜で観測された波向は地形の条件を受けていることを示している。そのため、沖合いでの波向との相関は弱い。このことから逆に、小名浜で観測された方向スペクトルをもとに、いわき沖の方向スペクトルを逆推定することが困難であることがわかる。

5. 実測値を用いた方向スペクトル分布形状に関する考察

5.1 方向スペクトル変動特性

図-7は、BDMにより推定された方向スペクトルをもとに、いわき沖に出現する波エネルギーの月平均値を32方位に分割して示したものである。縦軸は方向スペクトルを周波数に関して積分して得られたエネルギー分布、横軸は方位である。いわき沖で観測される方向スペクトルは、ピーク方向が各観測毎に相当変化する。これを1ヶ月毎に平均した値を表示したため、波のエネルギー分布は通年ではENEを中心としてNW~E~SWの広い範囲に分布している。これは沿岸域で観測される方向スペクトルが一年を通してほぼ同じ方向にピークが現れることと比較して、明らかに異なっている。これは前述のように、いわき沖では屈折による波向変化の影響が小さく、また、沿岸から十分離れているため、陸部の遮蔽による影響が小さいためである。図-7から明らかのように、深海域ではあらゆる方向から波が来襲し、その特性も年間を通して同じではなく、季節によって特有の性質を有している。ここで、今回の解析では季節の区分を冬季(12月~2月)、春季(3月~5月)、夏季(6月~8月)および秋季(9月~11月)の4つにわけて行った。これらは、当研究室で実施している集中処理解析に用いられている季節区分に一致している。

いわき沖では一般に夏季の終り~秋季(8月~11月)と冬季の終り~春季の始め(2月~4月)にかけて波高が大きく、夏季(5月~7月)には小さい。また、夏~秋と冬~春の場合では明らかにスペクトル形状が異なっており、前者ではSまたはEの1方向に明瞭なピークをもつ比較的幅広いスペクトル形状を示すのに対し、後者ではSとEの2方向にピークを有し、それぞれのスペクトルの方向集中度は比較的大きい。例えば、図-7中の4月にみられる両ピークのスペクトル密度の比は

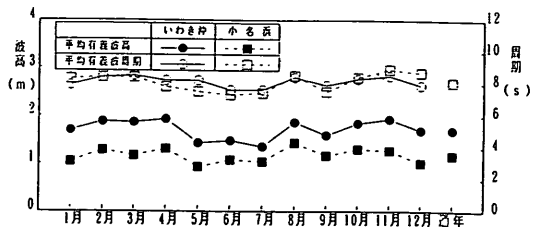


図-5 月別平均有義波の変動



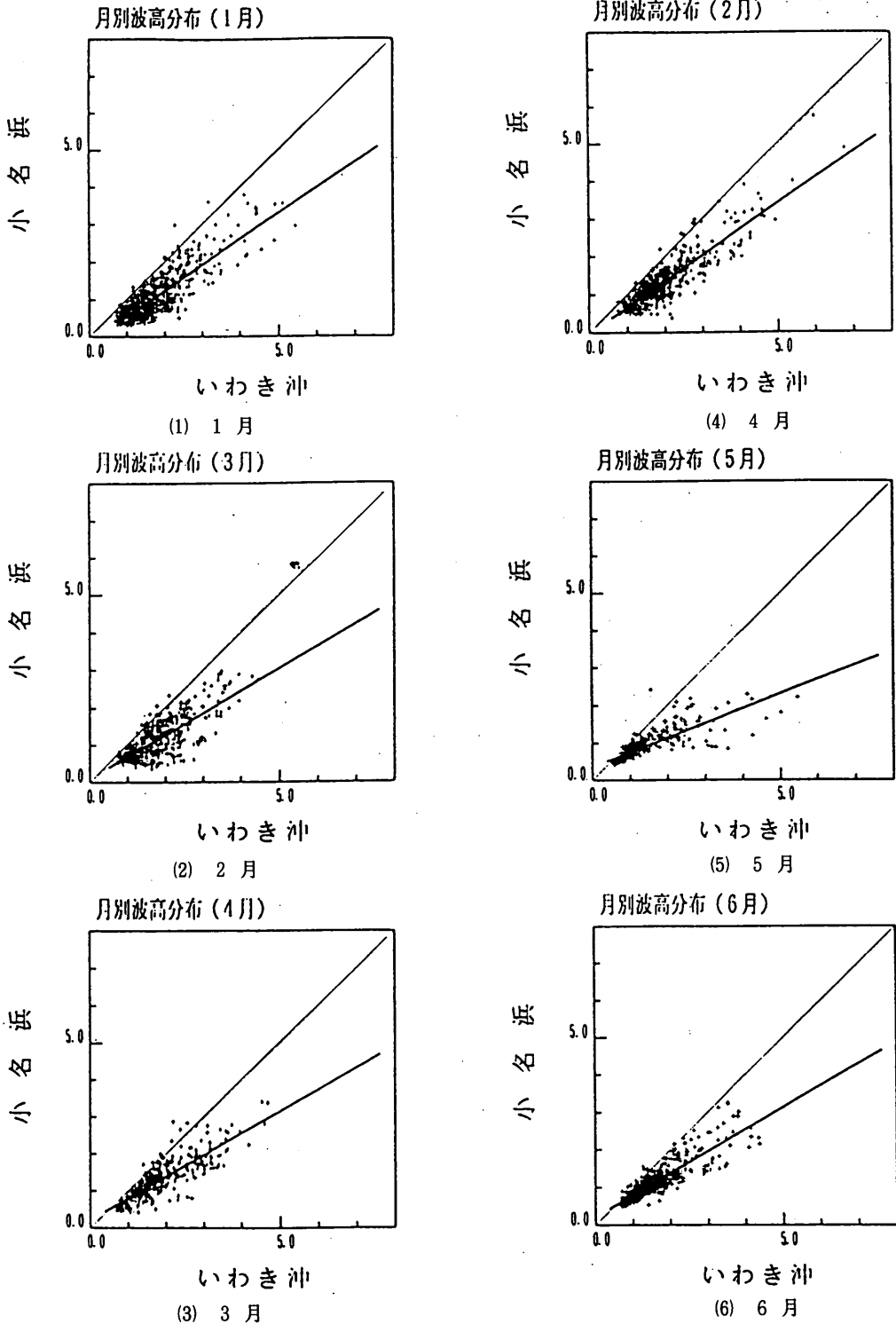


図-6 沖合いと沿岸域の有義波高の相関関係 (1~6月)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

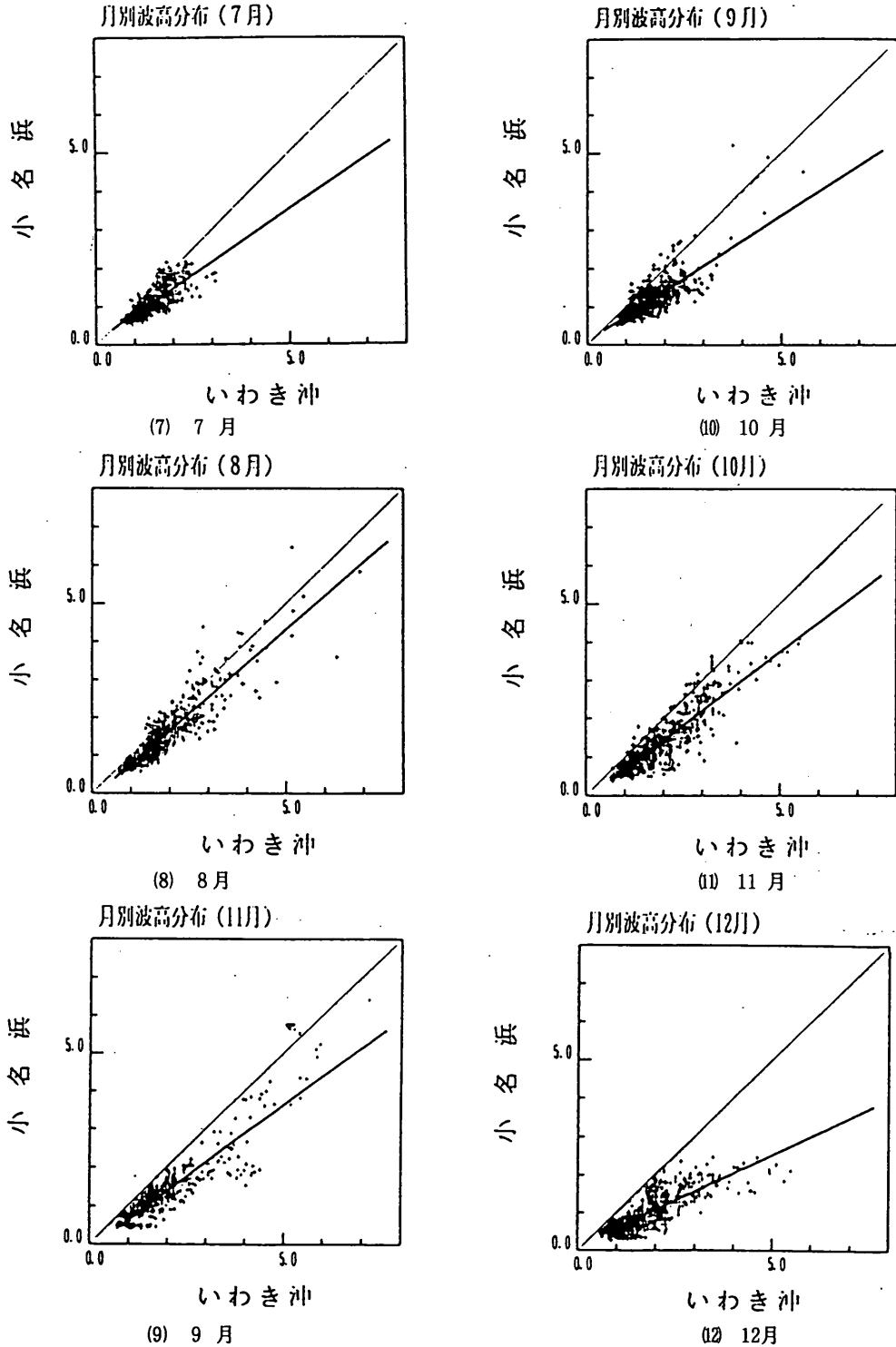


図-6 沖合いと沿岸域の有義波高の相関関係 (7~12月)

表-8 沖合いと沿岸域の有義波高の相関関係

月	a	b	r
1	0.683	-0.122	0.838
2	0.685	-0.010	0.875
3	0.586	0.104	0.749
4	0.590	0.203	0.842
5	0.389	0.371	0.836
6	0.584	0.208	0.878
7	0.681	0.114	0.813
8	0.888	-0.123	0.903
9	0.655	0.109	0.791
10	0.770	-0.105	0.895
11	0.752	-0.127	0.917
12	0.483	0.114	0.833

0.88程度であり、2番目のピークに対応する分布を無視出来ない。これは、2つの分布を生起する気象擾乱の要因・経路などが少なくとも2つ以上あることを示しており、これらの気象要因の相違によりそれぞれの分布が特性づけられている。

そこで、各々の波浪系を発生させる気象要因から、ここで対象とした期間の方向スペクトルをそれぞれ以下の

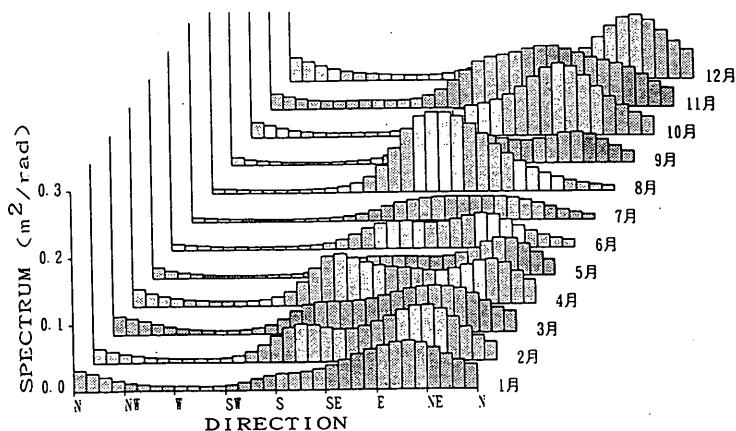


図-7 波エネルギーの方向分布の年間変動

ように取りまとめた。図-8 (1)~(12)は、それぞれ1月から12月までの方向スペクトルの月平均値を示したものであり、それぞれ冬季、春季、夏季および秋季にわけて季節毎に表示している。これらのそれぞれのピークに対応する方向スペクトルを比較すると、これらの分布特性は互いに異なっている。例えば、4月の場合、主な気象要因である南岸低気圧と日本海低気圧はともに移動性の低気圧であり、これらによりそれぞれ発生した2つのピークに対応する方向スペクトルは互によく似た形状を示している。これに対して1月の場合には、E~ENE方向のピークに対応する波エネルギーは十分発達した比較的鋭いスペクトル形状を示すのに比べて、N方向を中心としたなだらかなピークを有するスペクトルは十分に発達するにいたらず高周波数側に弱いピークを有するにとどまっている。

以下の記述からも明らかなように、沖波の方向スペクトルの形状は年間を通して一定ではなく、起因する気象要因によりかなり異なった方向分布形状を示すことがわかる。

① 冬季 (12~2月)

この期間に入射する波のエネルギーは、ENE方向に比較的鋭いピークを有する分布形状を示すが、ESEおよびN方向からもエネルギーが来襲している。これは、日本海低気圧による強い冬型の気圧配置のために北よりの方向から来襲するエネルギーが卓越するためである。

この期間の擾乱として1989年1月下旬に強い冬型気圧配置やその後の南岸低気圧の通過があったため、とくに1月には上記の傾向が顕著であった。N方向の高周波数側にみられる弱いピークは、図-1に示されるようにいわき沖ではW~N方向に対し比較的フェッチが短いために生じるものと考えられる。1月の平均方向スペクトル形状は他の場合と比べて比較的特定の方向に集中した形状を有するが、これは冬季の高波浪の要因である冬型の気圧配置が停滞性のものであるためと考えられる。

その反面、1990年2月は平年と比べて、シベリアの高気圧が弱く冬型気圧配置が長続きしなかったため、移動性の南岸低気圧の発生がみられた。そのため、平均方向スペクトルの分布形状は比較的広範囲に及んでいる。

また、1990年12月には季節外れの台風9028号および台風9028号崩れの低気圧を初めとする全国規模の擾乱が数多く発生した。これらの擾乱は秋季によくみられる性質のものであるため、12月の平均方向スペクトル形状は比較的秋季のものに近い特性を示すようになっていると考えられる。なお、秋季の平均方向スペクトル形状については④で改めて述べることにする。

#### ② 春季 (3~5月)

主な気象擾乱を引き起こす要因には南岸低気圧、日本海低気圧および2つ玉低気圧といった移動性の低気圧によるものがある。このため、それぞれの気象要因に対応した明瞭なピークをNE方向とS方向に有し、なだらかな形状の方向分布を示す。両低気圧ともに移動性の低気圧であり、黄海で発生した後にかなり速い速度で日本を東西(南西から北東へ)に通過する。日本海低気圧が通過する場合にはEN方向にピークが現れることが多く、S方向のピークは南岸低気圧の通過により現れることが多い。2つ玉低気圧の場合は両方の低気圧による影響を受けるため、多くの場合ピークが2つ現れるが、これらの低気圧は前線をとまることが多い。そのため、風場が変動するようになり、方向スペクトル形状の変動もさらに複雑となる。この時期の気象状態は変動が非常に激しく、方向スペクトルのピークの方向もこれに対応して変化する。図-8(3)~(5)では、それを1ヶ月で平均しているためかなりなだらかな方向分布となっている。

#### ③ 夏季 (6~8月)

6月および7月は静穏に近い状態であるのに対し、8月にはスペクトル値が大きくなっている。これは、1989年および1990年の両年において台風8917号を初めとする頻繁な台風の来襲があったことに起因する。このため秋季と同様な比較的なだらかな形状の方向分布を示すが、ピークの方向はESE方向を中心としている。これはこの時期(8月~9月初め)の台風が九州西岸から朝鮮半島へ通過するコースをとるためである。このため、いわき沖海域上への台風の通過はみられないが、台風通過前後にかけて太平洋南海から到達するうねり性の波の影響を受けていると考えられる。

6月および7月については、梅雨期にはもともと梅雨前線による気圧の谷はあまり大きく発達せず安定していること、また観測期間内にとくに顕著な低気圧が発達しなかったことからスペクトルの値が小さくなっていると考えられる。また、7月の後半についても、梅雨明けの後しばらくの間気圧配置が安定するために静穏に近くになっているものと考えられる。

#### ④ 秋季 (9~11月)

主となる方向はEであり、かなり幅広い方向分布形状を示す。これは、主要な擾乱の要因をなす台風や台風崩れの低気圧が非常に速い速度で当該海域を通過していくために、擾乱時の波向の変動がかなり大きくなるものと考えられる。9月のスペクトル形状はE方向とESE方向の2つのピークを有しており、8月と10月の形状特性を重ね合わせたものとなっている。これらは、いずれも台風による擾乱を要因としているが、時期によりその通過経路が変化するために異なった方向にピークが現れていると考えられる。

8月と10月の方向スペクトルを比較すると、台風による擾乱を要因としていても、季節により異なった形状を示す方向スペクトルが現れていることがわかる。図より明らかなように、8月の方向スペクトルは明瞭な1ピークを有するのに対し、10月の方向スペクトルは第2ピークとしてS方向を中心とした弱いピークを低周波側に有している。台風時の波浪は台風の中心方向に吹き込む風波と太平洋南海から来襲するうねりから構成されるが、この時期、台風の通過経路が比較的東寄りになるためにうねりの入射する場が多くなり、顕著な2方向系波浪が出現しやすくなるためであると考えられる。このような場合を対象として、多くのケースで各時刻毎の方向スペクトルを検討すると、風波とうねりに対応してそれぞれ異なる方向に明瞭なピークが見られる。

この期間、主な擾乱として1990年8月~10月にかけて平年を上回る頻繁な台風の来襲があった。このため、この期間のスペクトルの値は平年値よりやや大きくなっている可能性がある。また、1989年10月下旬から11月初旬にかけて二つ玉低気圧の通過およびその後の強い冬型気圧配置がみられ、1989年11月中旬にも強い冬型気圧配置があった。このため、11月のスペクトル形状は秋季と冬季の形状をあわせたような分布形状となり、波方向にかなりなだらかな分布となっている。

### 5.2 多方向系波浪の方向スペクトル特性

多方向から波浪が来襲する場合、平均波向のような波向に関する代表波諸元がどの程度多様な方向スペクトル特性を代表し得るかはあまり明確ではない。そこでここでは、解析対象期間から多方向性の波浪が出現する場合を選び、この場合の平均波向の変動特性を調べることとした。なおここでは、方向スペクトルが極値を示す波向を選び、そのピーク値の大きさが*i*番目に大きな波向をピーク波向  $\theta_{pi}$  と定義している。

図-9は、代表的な2方向系波浪が出現した場合の平均波向とピーク波向の経時変化を示している。図中の太

線は平均波向を示しており、○印および×印は、それぞれ第1ピーク波向、第2ピーク波向を表している。縦軸と横軸はそれぞれ波向と時刻を示している。

図-9に見られるように、平均波向は第1ピーク波向に強く依存しており、中央波向( $=(\theta_{p1} + \theta_{p2})/2$ )とは異なっている。このときの方向スペクトルの経時変化を図-10(a)~(c)に示すが、2つのピークを構成する方向スペクトルの性質は互いに異なっており、NNE方向にピークを有する分布は、S方向にピークを有する分布に比べて、比較的周期が長く方向集中度が大きい。

図-10のそれぞれの図の上方および右側に示すヒストグラムはそれぞれ周波数および方向角に関して方向スペクトルを積分した値を示したものであり、図中の縦線は平均波向の方向を表している。図-10に見られるように、1990年3月12日4時~10時の方向スペクトルでは、周波数スペクトル上ではNNE方向にピークを有する分布が他に比べてエネルギーが大きい場合もあるが、方向別のエネルギー分布ではS方向にピークを有する分布とほぼ同等もしくはS方向にピークを有する分布の方がエネルギーが大きくなっている。このような場合にも、平均波向は方向スペクトルのピーク値の大きいNNE方向寄りに表示されており、方向集中度の高い分布の影響をより強く受ける。

この問題に関し、合田<sup>9)</sup>は数値シミュレーションによる検討結果から、2方向波浪系の方向スペクトルを対象として平均波向を用いる場合には、両波群の伝播方向が大きく異なる場合には、エネルギーの大きな波群からより強い影響を受け、とくに特性の異なる2つの波群では、方向集中度の大きい波群あるいは周期の短い波群に平均波向が偏向する傾向があることを示している。したがって、今回の解析結果の場合には、周期の影響よりもむしろ方向集中度の影響が強く現れたため平均波向がNNE方向に偏向したものと考えられる。風波とうねりが重合した2方向波浪の場合には、一般にうねり性の波群は方向集中度が大きく周期が長い。今回の解析結果からは、方向集中度の影響がより強く現れているために平均波向がうねり性の波群に追従する形になっている。ただし、今回の解析では共分散法による平均波向の計算に対し、海底付近の同一地点で計測された水平方向流速と水圧データを用いている。そのため、波向の計算において長周期の波の影響をより強く受けている可能性がある。

### 5.3 気象擾乱下における方向スペクトルの変化特性

4.1に示したように波浪諸元の変動は、気象要因によって支配される。同様に、図-8のそれぞれの月の方向スペクトル形状も、起因する気象擾乱によって特徴づける

ことができる。そこで、今回解析の対象としたデータを典型的な気象要因により分類し、方向スペクトルとの関係が比較的明確にあらわれている例を5ケース抽出した。次項以後の表題は主な気象要因を示しており、かつこの時刻は最大有義波高の起時である。そして、対象期間の天気図と気象概要を参考にしながら、方向スペクトルの変化特性について検討を行った。ここで、図-11(1)~(5)は、それぞれ1~5番目のケースに対する気象擾乱下の方向スペクトルの変化を示しており、図-12(1)~(5)は、それぞれ対応する期間中の天気図である。

#### (1) 台風8913号による高波(1989年8月6日8時)

台風8913号は、先に発生した台風8912号の影響のため、比較的東方の地点で進路を転向し、伊豆諸島南方で北上を開始している。そのため、太平洋北東岸では上陸の被害を受ける以前からうねり性の波浪の来襲を受け、特徴的な方向スペクトルが観測されている。擾乱対象期間(1989年8月5日~8月6日)の天気図は図-12(1)に示すとおりであり、このときの気象概要は次のとおりであった。

7月31日、南鳥島の南西海上で発生した台風8913号は、発達しながら北西から西へ進み、8月4日には中心気圧950mb、中心付近の最大風速40m/sと超大型の強い台風となって父島の東南東の海上で停滞していた。一方、7月29日に沖縄の南海上で発生した台風8912号は、東シナ海を西北西に進み、8月4日に中国大陸へ上陸した。

5日から台風8913号は、勢力を落としながら北上を始め、伊豆諸島の東方海上を通過し、6日15時頃千葉県銚子市付近に上陸し、その後、東北地方南部を通過して7日夜半には新潟県北部から日本海へ抜けた。

擾乱対象期間の方向スペクトルを図-11(1)に示す。6日2時から14時にかけて、2つのピークをもつ方向スペクトルが観測された。そのピーク値の大きな方はSE方向周辺の低周波数側にみられ、もう1つのピークがENE方向周辺の高周波数側にみられる。前者は南方に位置する台風によるうねりであり、後者は台風接近にともなう東風による風波に対応すると考えられる。最大有義波高の起時は台風の上陸時とほぼ対応しているためにSSE方向からのうねりだけが観測されている。

#### (2) 台風8917号による高波(1989年8月28日0時)

台風8917号は、夏季の台風の典型的な進路である沖縄近海から高知南岸に上陸する経路をとり、日本海上を通過した後に消滅した。したがって、対象期間内に観測された方向スペクトルについても、夏季の台風時の典型的な例を示していると考えられる。擾乱対象期間(1989

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

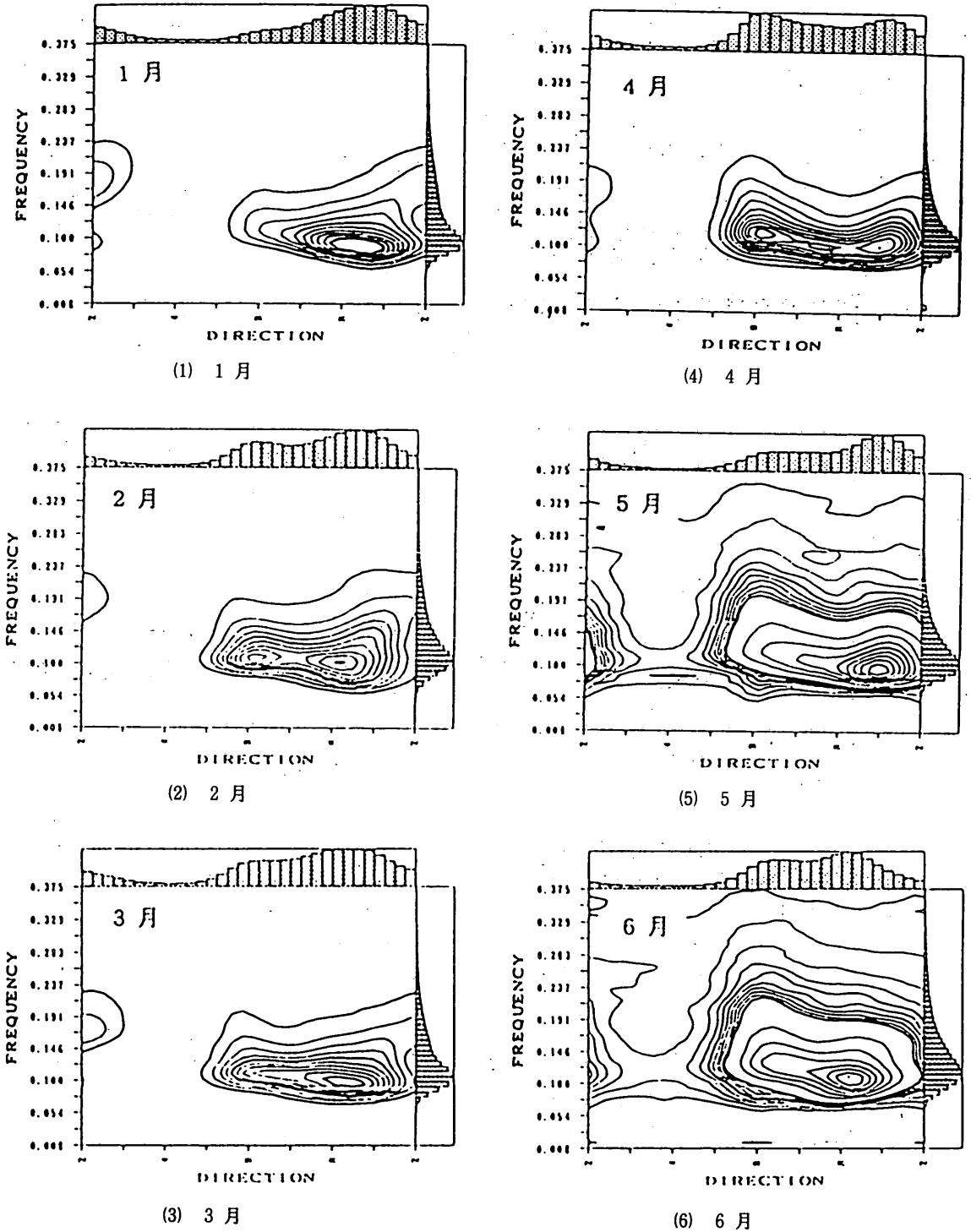


図-8 方向スペクトルの月別平均値 (1~6月)

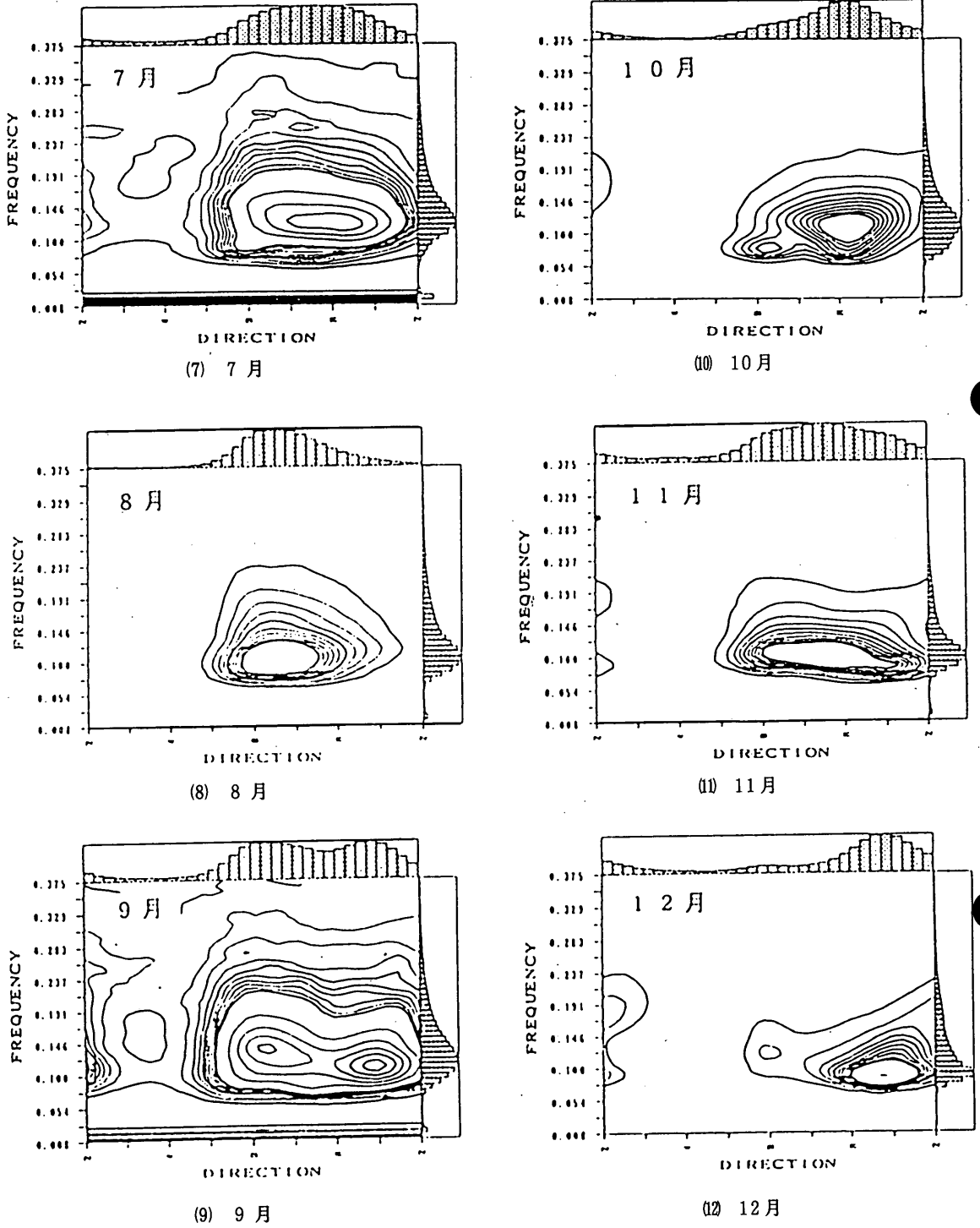


図-8 方向スペクトルの月別平均値(7~12月)

## 沖波の方向スペクトルの出現特性（第1報）

— いわき沖の観測結果 —

年8月27日～8月28日)の天気図は図-12(2)に示すとおりであり、このときの気象概要は次のとおりであった。

沖繩の西にあたる東シナ海にあった弱い熱帯低気圧は南東に進み、25日15時に石垣島近海で台風8917号となり、次第に向きを東から北東に変え本州に接近した。その後、27日09時頃高知県室戸市付近に上陸し、四国、近畿、北陸、東北、北海道地方を通過してオホーツク海へ抜けた。

擾乱対象期間の方向スペクトルを図-11(2)に示す。この期間に観測された方向スペクトルは1つのピークをもつ。その形状ははじめSE方向を中心に比較的広い幅をもって分布していたが、台風の上陸とともに次第にSSE方向に集中度の比較的高いピークをもつようになる。これは、台風が室戸を上陸し風波の発生が活発でなくなった後も、台風中心からの距離が遠いためにうねり性の波浪が発達しながら来襲するので、方向集中度が次第に大きくなったものと考えられる。

(3) 台風8925号による高波(1989年10月8日12時)

台風8925号は、日本に上陸することなく比較的速い速度で太平洋東海上を通過していった。これは、秋季の終わりによくみられる台風の進路である。擾乱対象期間(1989年10月7日～10月8日)の天気図は図-12(3)に示すとおりであり、このときの気象概要は次のとおりであった。

マリアナ諸島の東方海上に発生した弱い熱帯低気圧は西に進み、2日午前、グアム島の東海上で台風8925号となった。台風は、発達しながら次第に進路を北北西に変え、5日午後には父島の南海上で中心気圧950mb、中心付近の最大風速40m/sと大型で強い台風となった。台風は勢力を維持したまま北上を続け、7日早朝には父島の西南西の海上に達した。その後は、勢力をやや弱としながら北北東から北東へ進路を変えて関東の東方海上を経て日本から次第に遠ざかった。

一方、6日から7日にかけて樺太付近にあった低気圧が東へ進んでオホーツク海へ入り、低気圧の中心から延びる前線が北海道から東北地方を通過した。また、関東沖から四国沖にも台風の影響によって発生した前線が停滞した。

8日は、大陸から移動性高気圧が西から張り出してきたため一時的に冬型気圧配置となった。

擾乱対象期間の方向スペクトルを図-11(3)に示す。2つのピークをもつ方向スペクトルが8日0時から8日22時にかけて観測された。8日8時頃までは、NE方向の高周波数側にみられたピークの方が、S方向の低周波

数側にみられるものより発達していたが、8日10時頃から大小関係が逆転する。これは、8日8時頃まではオホーツク海低気圧とこれからの延びる前線の影響が強かったのが、台風の接近にとまないうねりの影響が次第に強くなっていったものと考えられる。

(4) 日本海低気圧による高波(1990年3月12日8時)

この日本海低気圧は沿海州で発生した低気圧をとまないうねりながらかなりの速度で日本上空を通過している。したがって、この観測期間内では複数の気象要因による影響が、観測された方向スペクトルを特徴づけているものと考えられる。擾乱対象期間(1990年3月11日～3月12日)内の天気図は図-12(4)に示すとおりであり、このときの気象概要は次のとおりであった。

11日、黄海と沿海州にあった二つの低気圧は、12日にはそれぞれ日本海と北海道の北に進んで発達した。12日夜には一つにまとまって釧路沖に達し、冬型の気圧配置となった。13日には、この低気圧が千島南部で中心気圧976mbと非常に発達し、北日本を中心として冬型気圧配置が続いた。14日は、日本付近は移動性高気圧に覆われてきて冬型気圧配置は解消した。

擾乱対象期間の方向スペクトルを図-11(4)に示す。方向スペクトルは明確な2つのピークをもち、最大有義波高の起時前後12日10時までは、NE方向の低周波数側にみられるピークの方がS方向の高周波数側にみられるピークよりピーク値が大きく発達している。しかし、12日12時頃からはピークの大小関係が逆転し、次第にS方向だけの単峰型となる。これは、日本海と北海道の北に進んだ低気圧とこれにとまないうねりによるNE方向の高波が、低気圧が1つにまとまるとともに消滅し、S方向からの高波が卓越してきたものと考えられる。

(5) 台風9011号による高波(1990年8月10日20時)

台風9011号は、南太平洋上に長期間停滞した台風9010号に追従しながら、連続して日本の太平洋岸を通過した。そのため、方向スペクトルには、台風9010号と台風9011号の両者の影響を受けて複雑な形状を示している。擾乱対象期間(1990年8月9日～8月10日)の天気図は図-12(5)に示すとおりであり、このときの気象概要は次のとおりであった。

5日3時、東シナ海で発生した弱い熱帯低気圧は、種子島付近を通過して南下し、7日3時に日本の南で台風9011号となった。8日には進行方向を北に変え、10日7時頃中型で並みの強さの勢力(中心気圧975mb、最大風速30m/s)で静岡県御前崎付近に上陸し、この年日本に上陸した最初の台風となった。台風は一度三陸沖に抜けたが、再び北上して11日12時頃根室半島西部



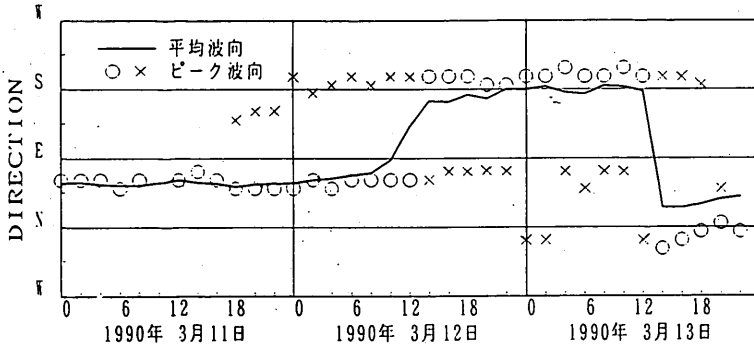


図-9 代表波向諸元の経時変化

を通過し、11日21時千島付近で温帯低気圧となった。

擾乱対象期間の方向スペクトルを図-11(5)に示す。方向スペクトルは10日0時から8時にかけて3つの顕著なピークをNE, SおよびSE方向に有する。これらは、それぞれ、台風9010号の影響によるピークと、台風9011号による低周波数側のピークおよび高周波数側のピークに対応している。これが、台風9010号の通過にともなって、次第に台風9011号によるうねりと風波だけとなり、最大有義波高の起時にはS方向だけから来襲する高波となる。

## 6. ま と め

以上、本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) いわき沖の波浪観測より得られた方向スペクトル形状は1年を通して一定でなく通年的な変動特性をもつ。この特性は主となる気象要因に支配され、気象擾乱の種類とその進路によってよく説明できる。
- (2) 複数の気象要因による擾乱時の方向スペクトルはこ

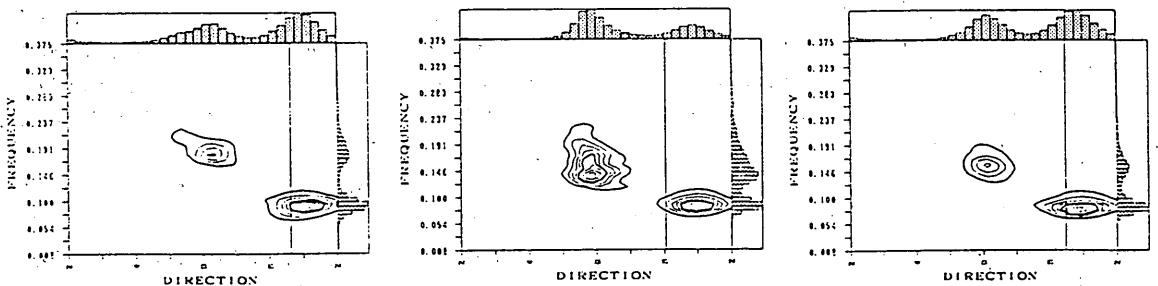
れらに対応したピークをもつ。この場合の代表波向は、それぞれのピークのピーク値と方向集中度に支配され、ピークがそれぞれに示す波向やこれらの中央波向とは必ずしも一致しない。

(3) 解析対象となった波浪観測結果によると、既往の沿岸域の観測結果と比べ、水位の出現分布はより正規分布に近い形状となる。しかしながら、 $1/n$ 最大波高  $H_{1/n}$  の有義波高  $H_{1/3}$  に対する比は、波高

の確率分布を Rayleigh 分布と仮定した場合に比べ小さくなる傾向がみとめられる。

- (4) 沖合い(いわき沖)と沿岸域(小名浜港)の有義波高の間には強い相関があり、両者の月別平均有義波高の比は1.5倍前後で沖合いで得られた観測値の方が大きくなる。これに対し、両者の平均波向間の相関は弱い。これは沿岸域で観測される平均波向は海底地形により影響を受けているので、沖合いの波向に鈍感になるためである。

以上より明らかなように、外洋の方向スペクトルの出現特性は、これまでわれわれの認識していた沿岸域の方向スペクトルの出現特性とはかなり異なっており、多様性に富んでいる。また、沿岸域で得られた波浪情報をもとに沖波に換算する現行の方法にも多くの問題点があることがわかった。今後、いわき沖で観測され、蓄積される深水域の方向スペクトルの多様な出現特性を把握することにより、港湾・海岸事業あるいは海洋開発等の種々の目的に対し、これらの情報の有効活用を図って行く必要がある。



(1) 1990年3月12日0時

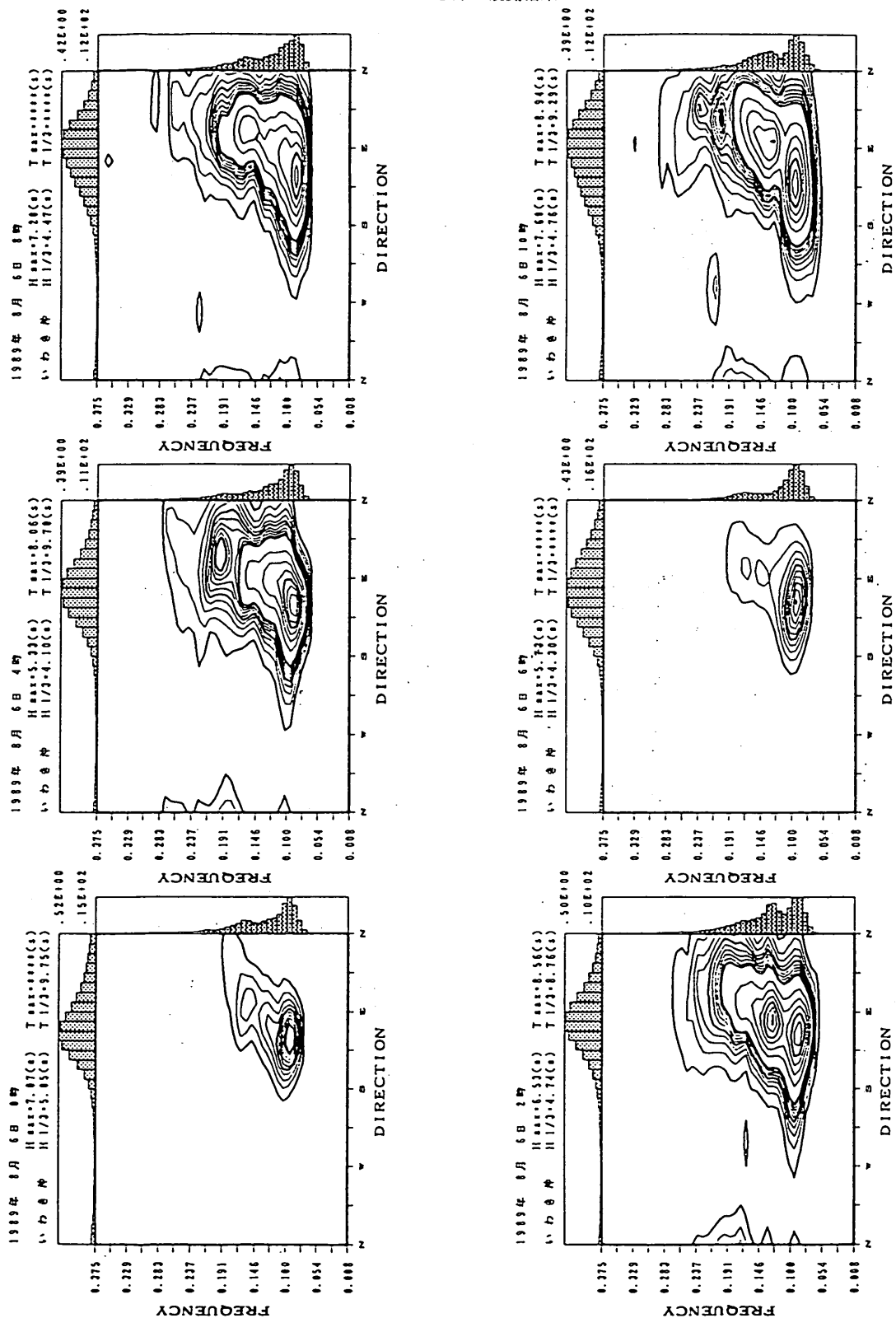
(2) 1990年3月12日4時

(2) 1990年3月12日4時

図-10 2方向系波浪時の平均波向の関係

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —



図一11(1) 擾乱時の代表方向スペクトル (1989年8月6日午前)

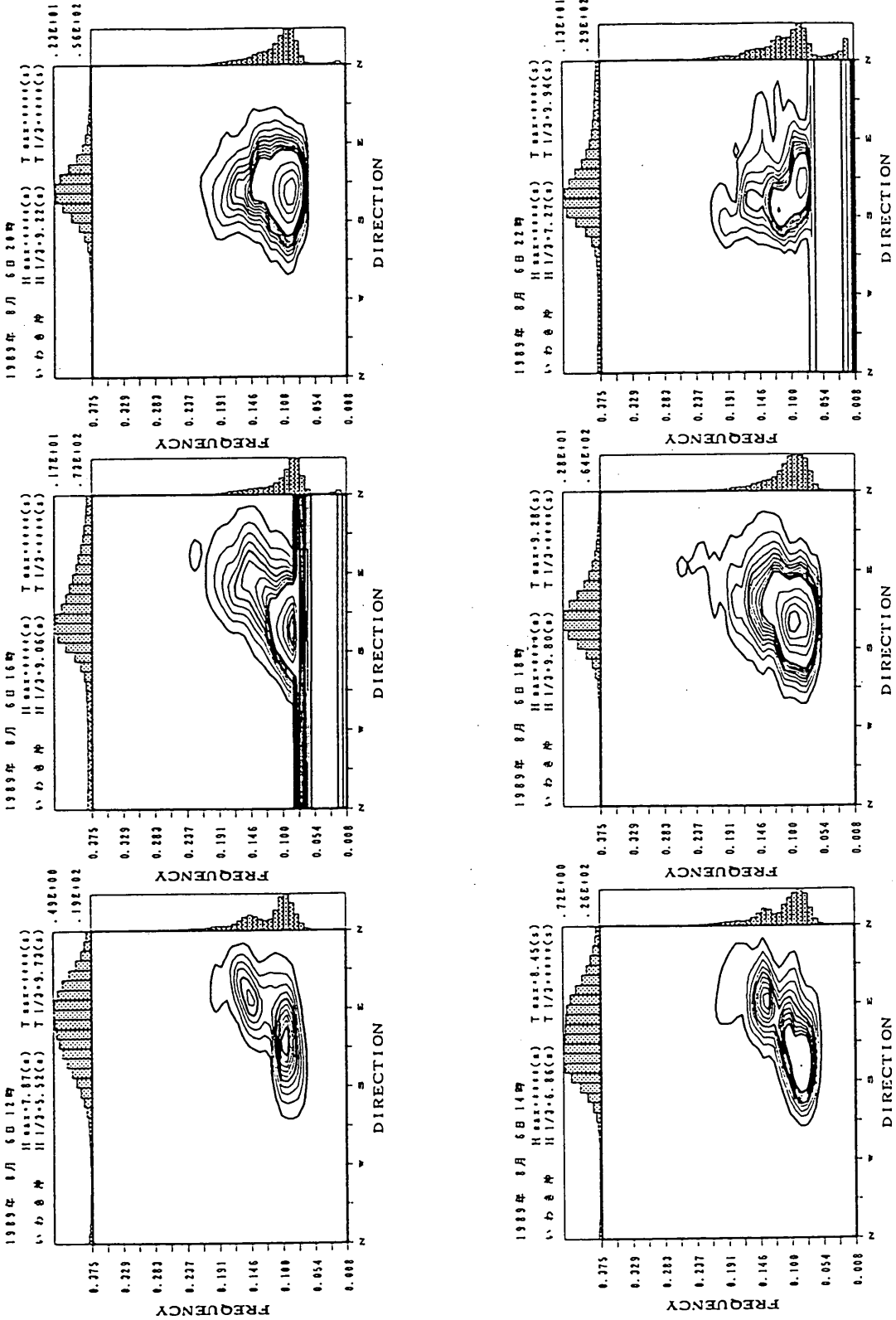


図-11(1) 攪乱時の代表方向スペクトル (1989年8月6日午後)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

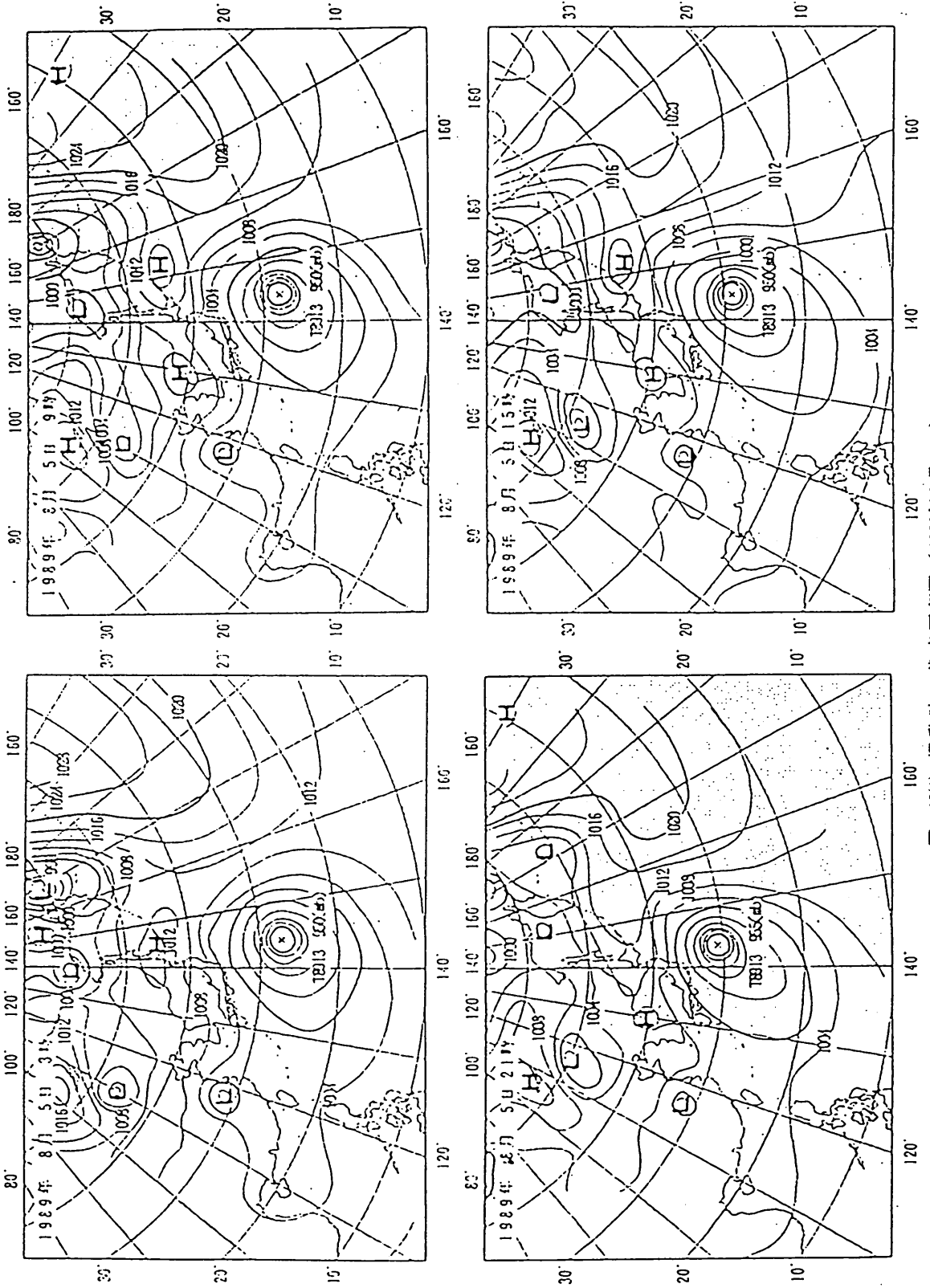


図-12(1) 擾乱時の代表天気図 (1989年8月5日)

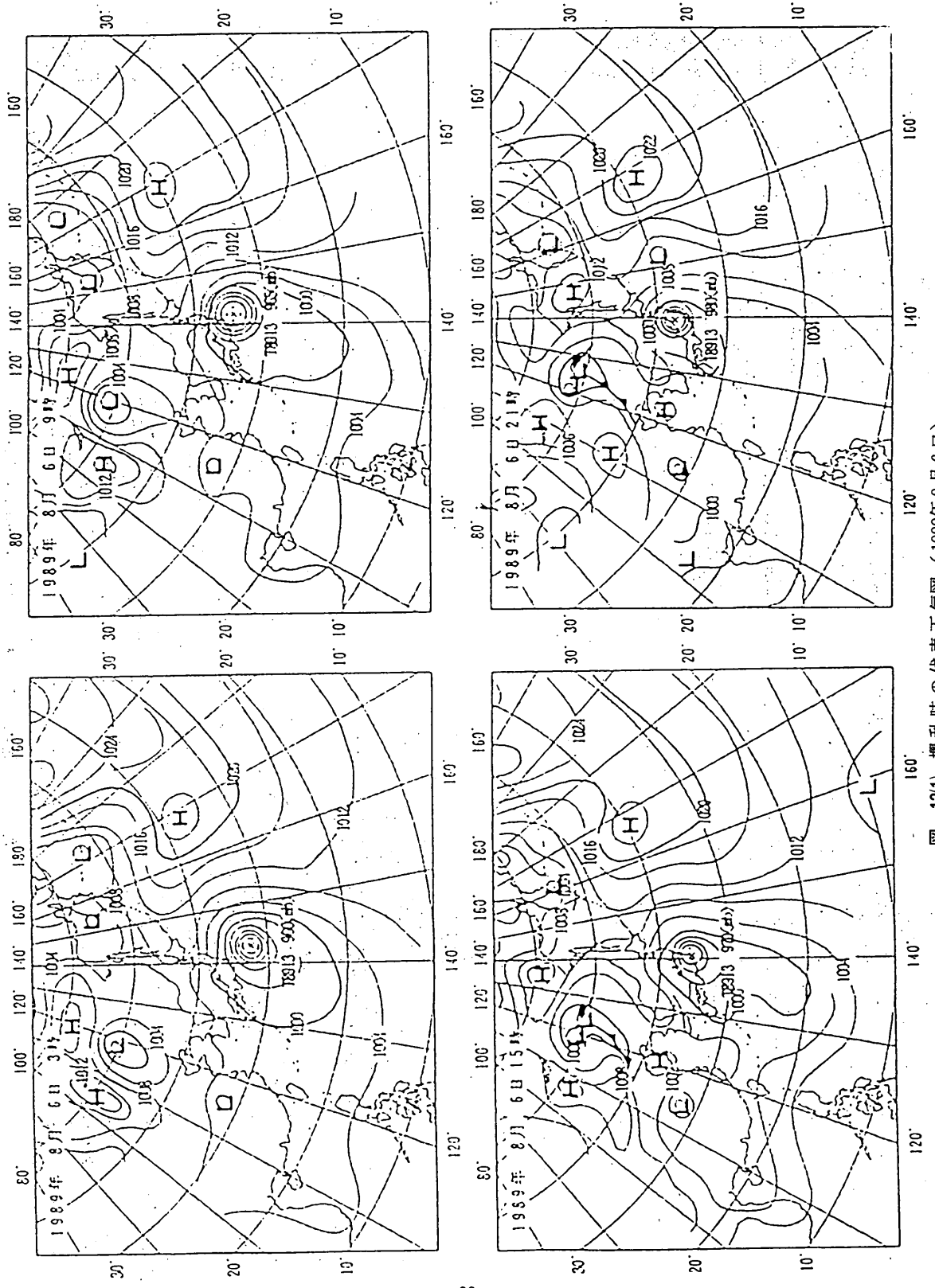
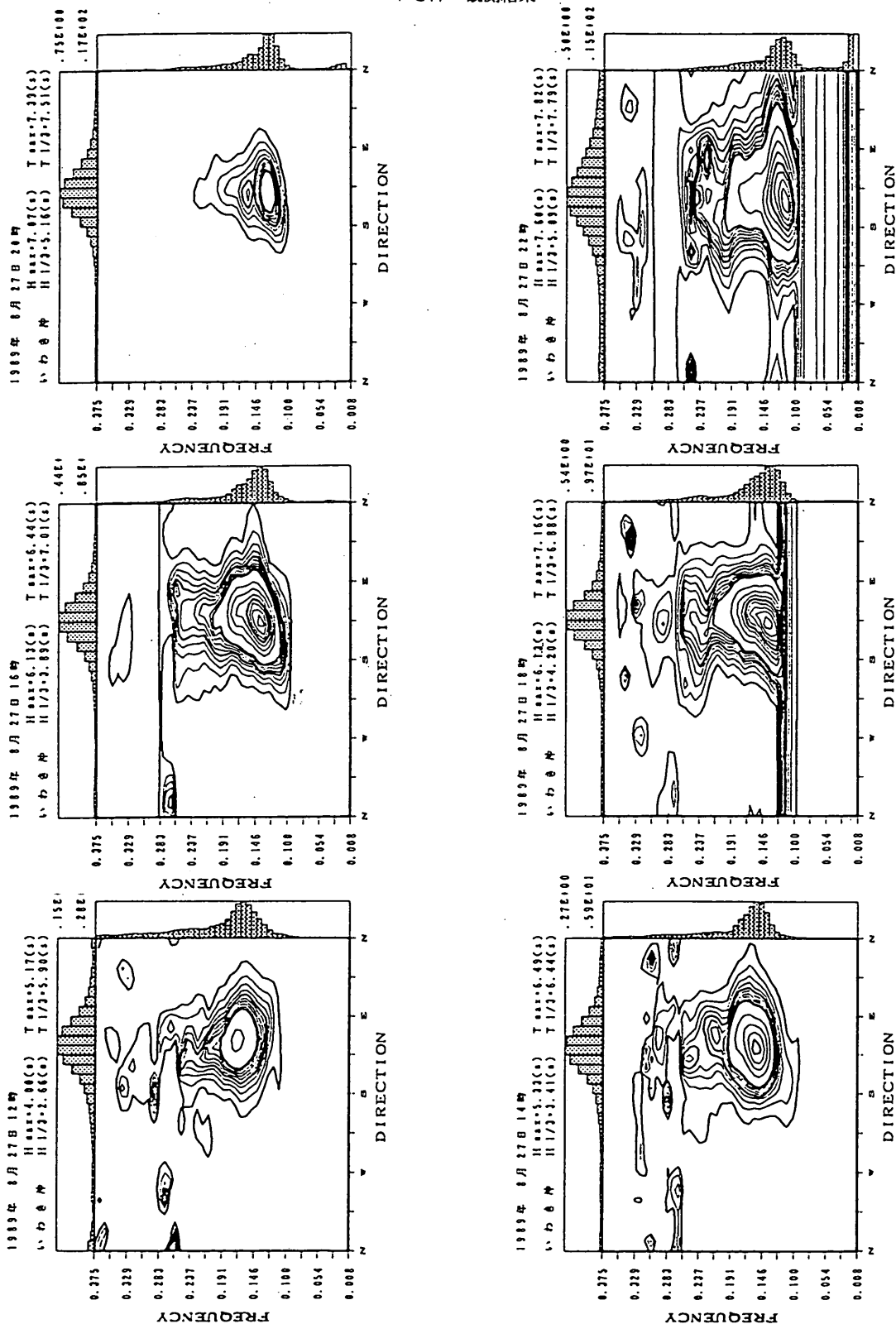


図-12(1) 攪乱時の代表天気図 (1989年8月6日)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —



図一1(2) 攪乱時の代表方向スペクトル (1989年 8月 27日午後)

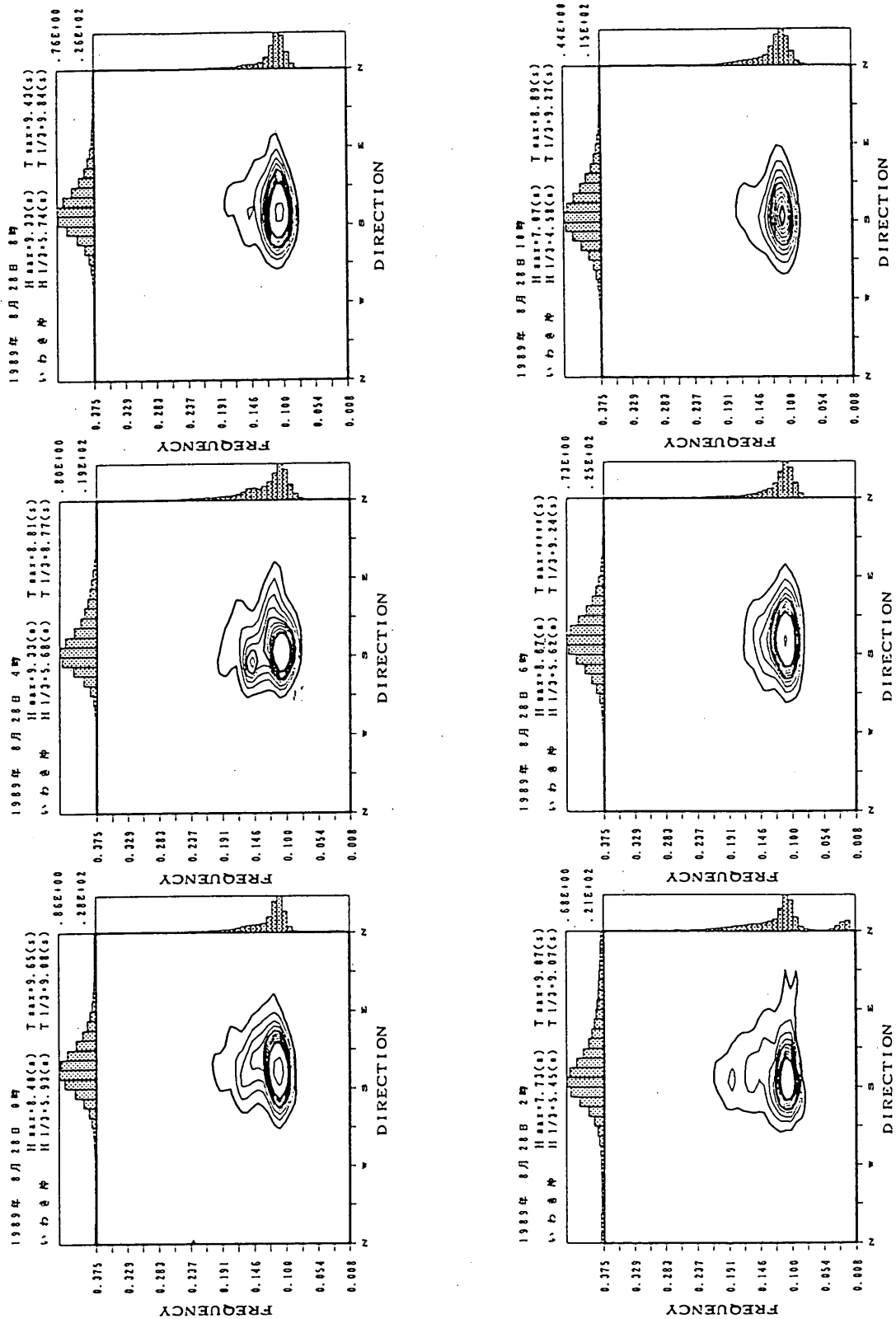


図-11(2) 攪乱時の代表方向スペクトル (1989年8月28日午前)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

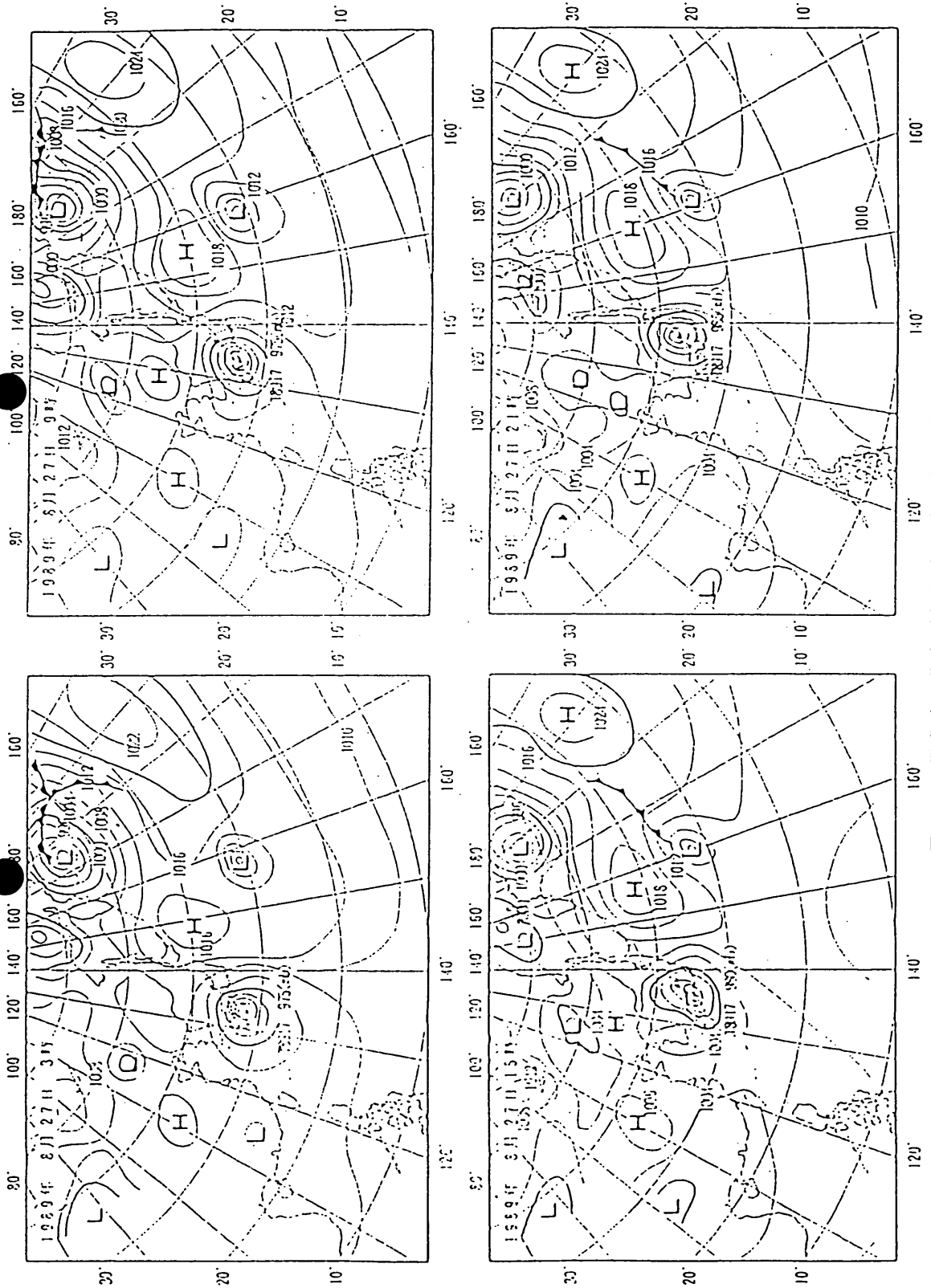


図-11(2) 擾乱時の代表天気図 (1989年8月27日)



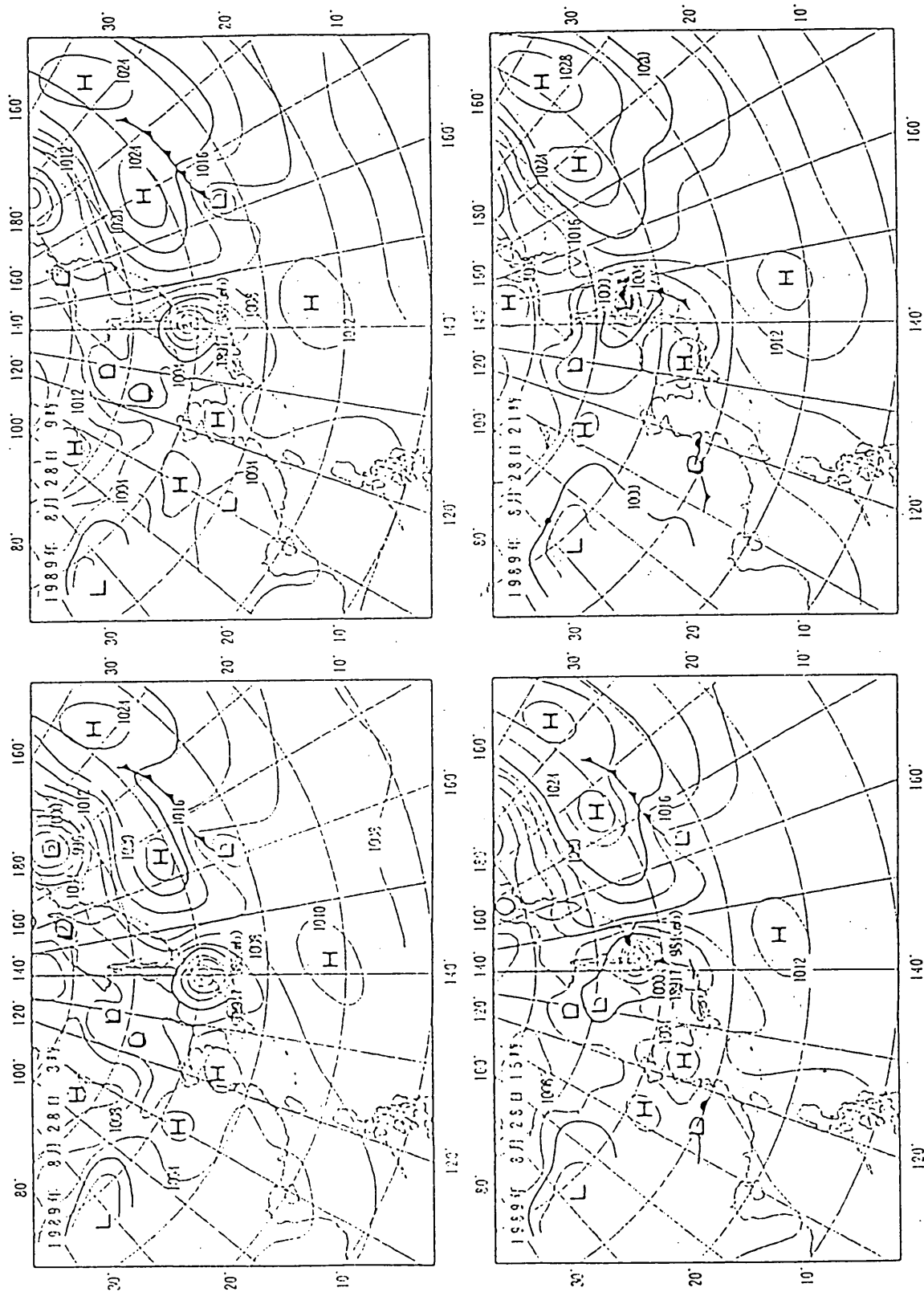


図-11(2) 擾乱時の代表天気図(1989年8月28日)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

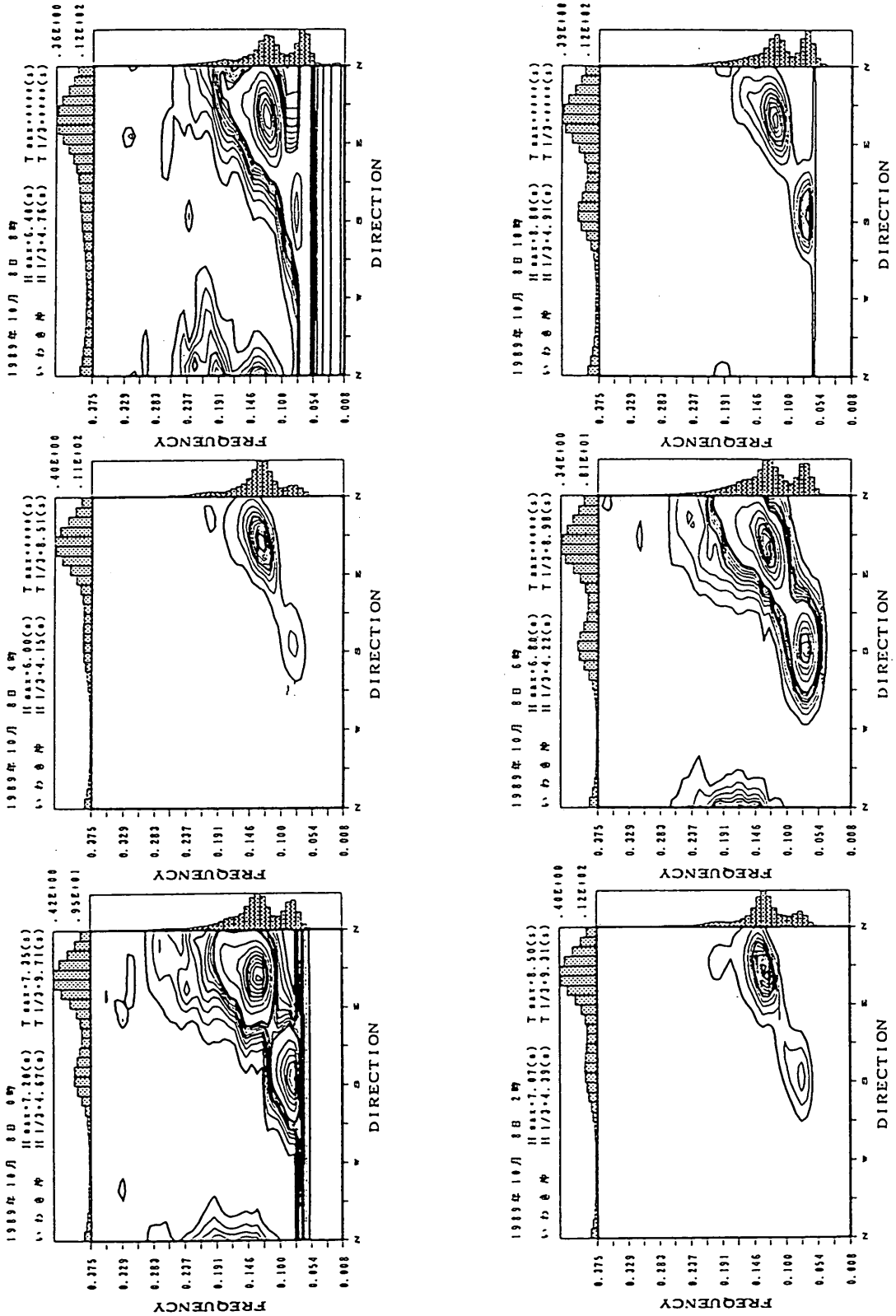


図-11(3) 擾乱時の代表方向スペクトル (1989年10月8日午前)

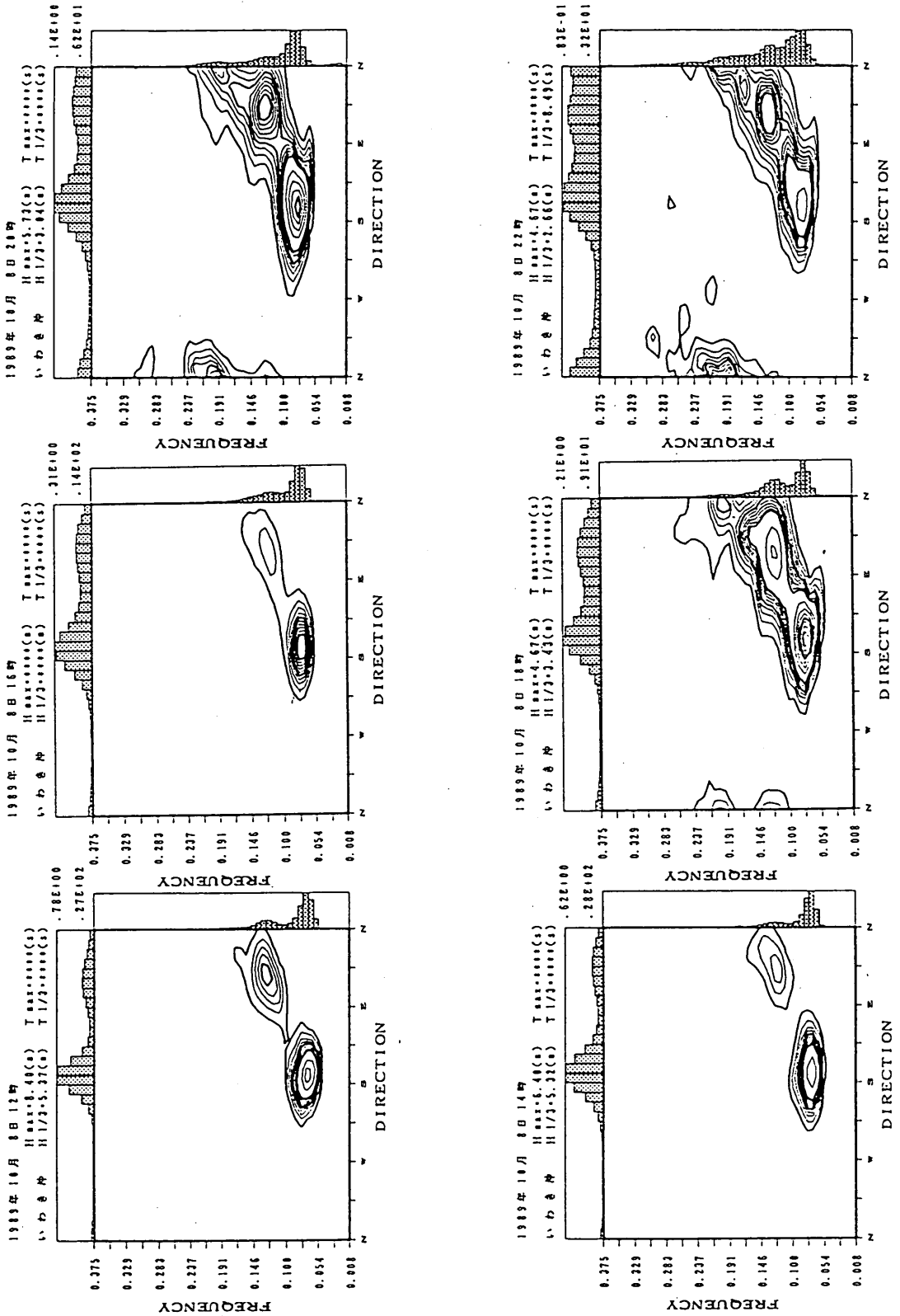


図-11(3) 攪乱時の代表方向スペクトル (1989年10月8日午後)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

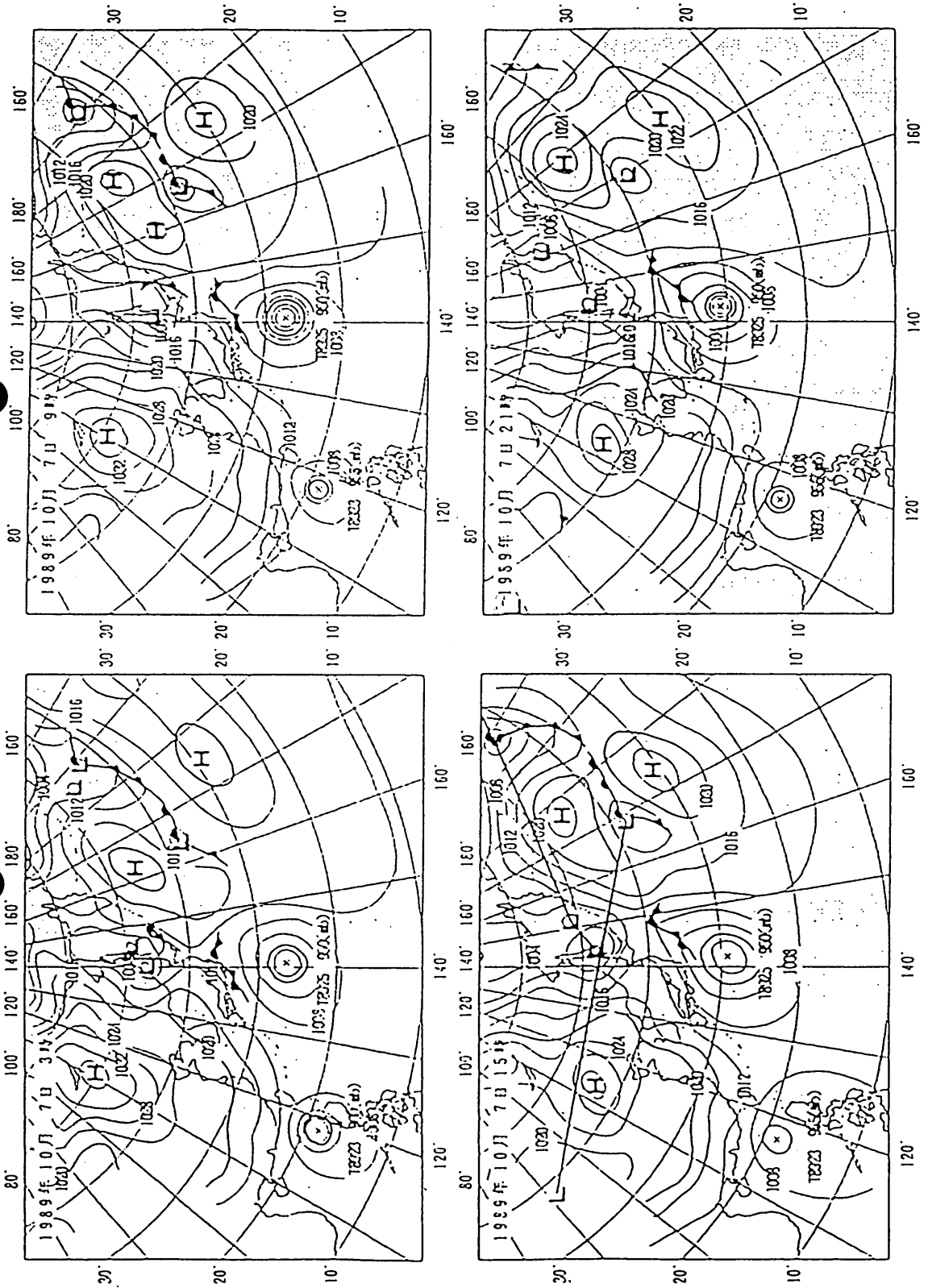
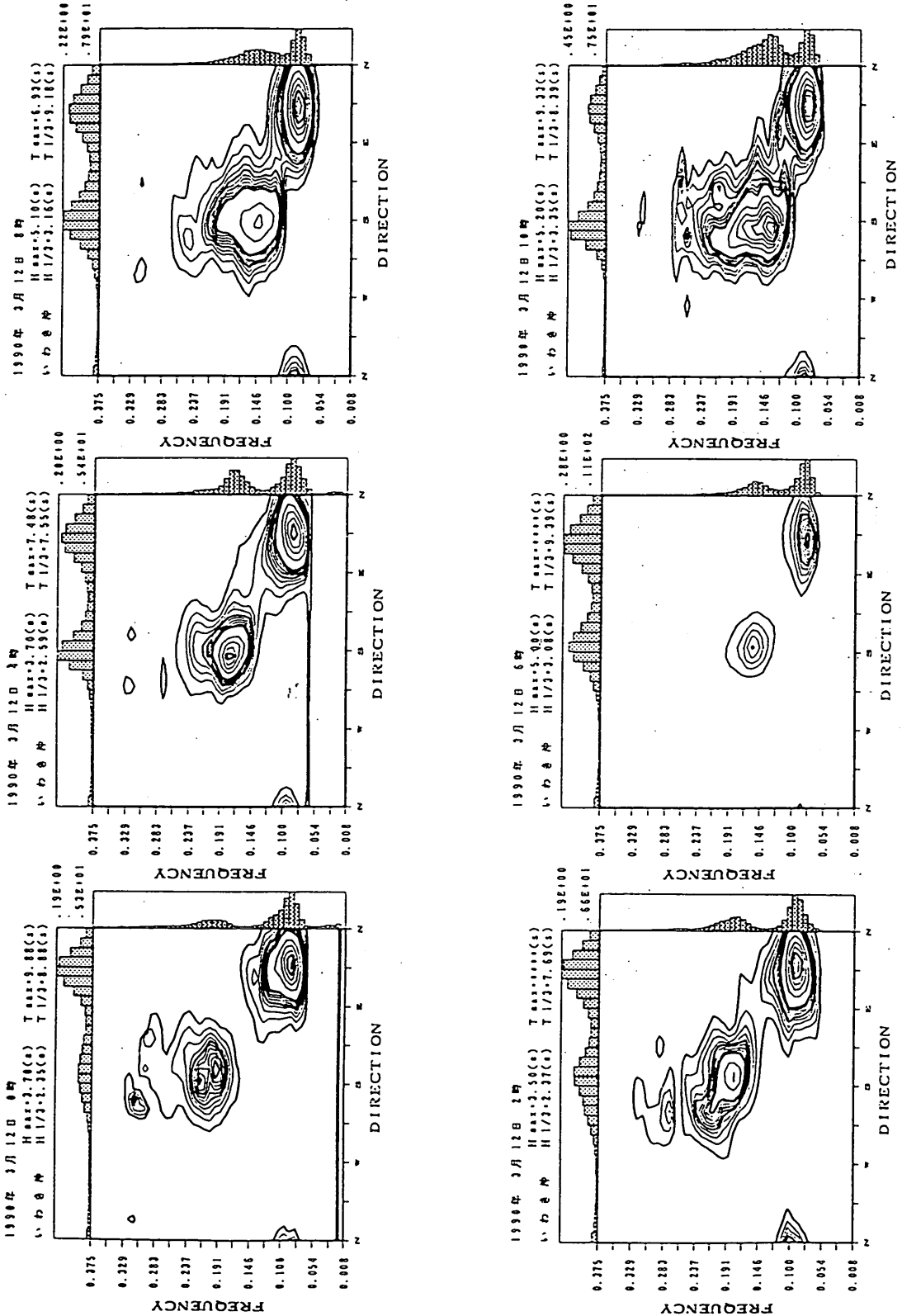


図-12(3) 擾乱時の代表天気図 (1989年10月7日)



沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —



図一(14) 攪乱時の代表方向スペクトル (1990年3月12日午前)

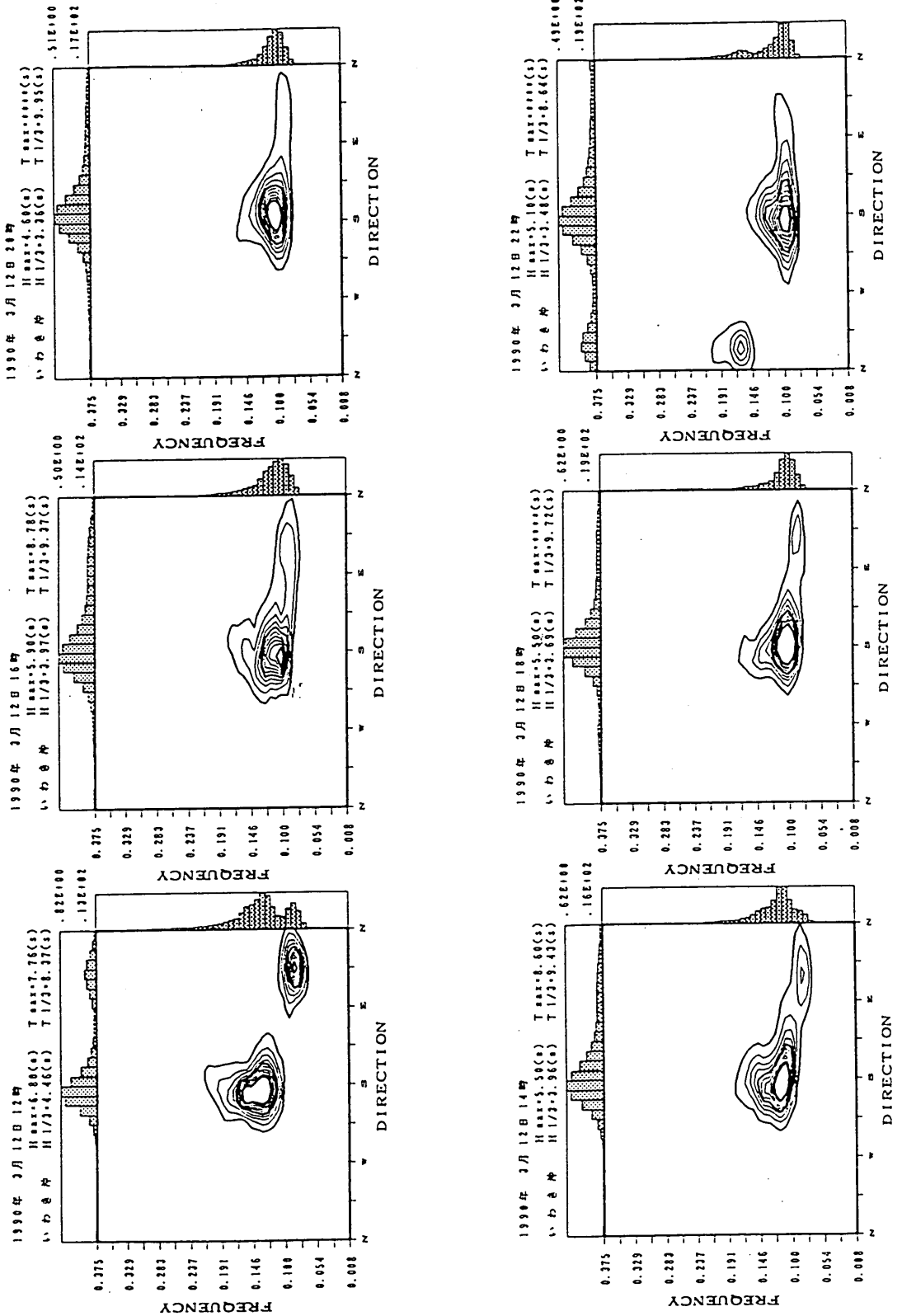


図-11(4) 擾乱時の代表方向スペクトル (1990年3月12日午後)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

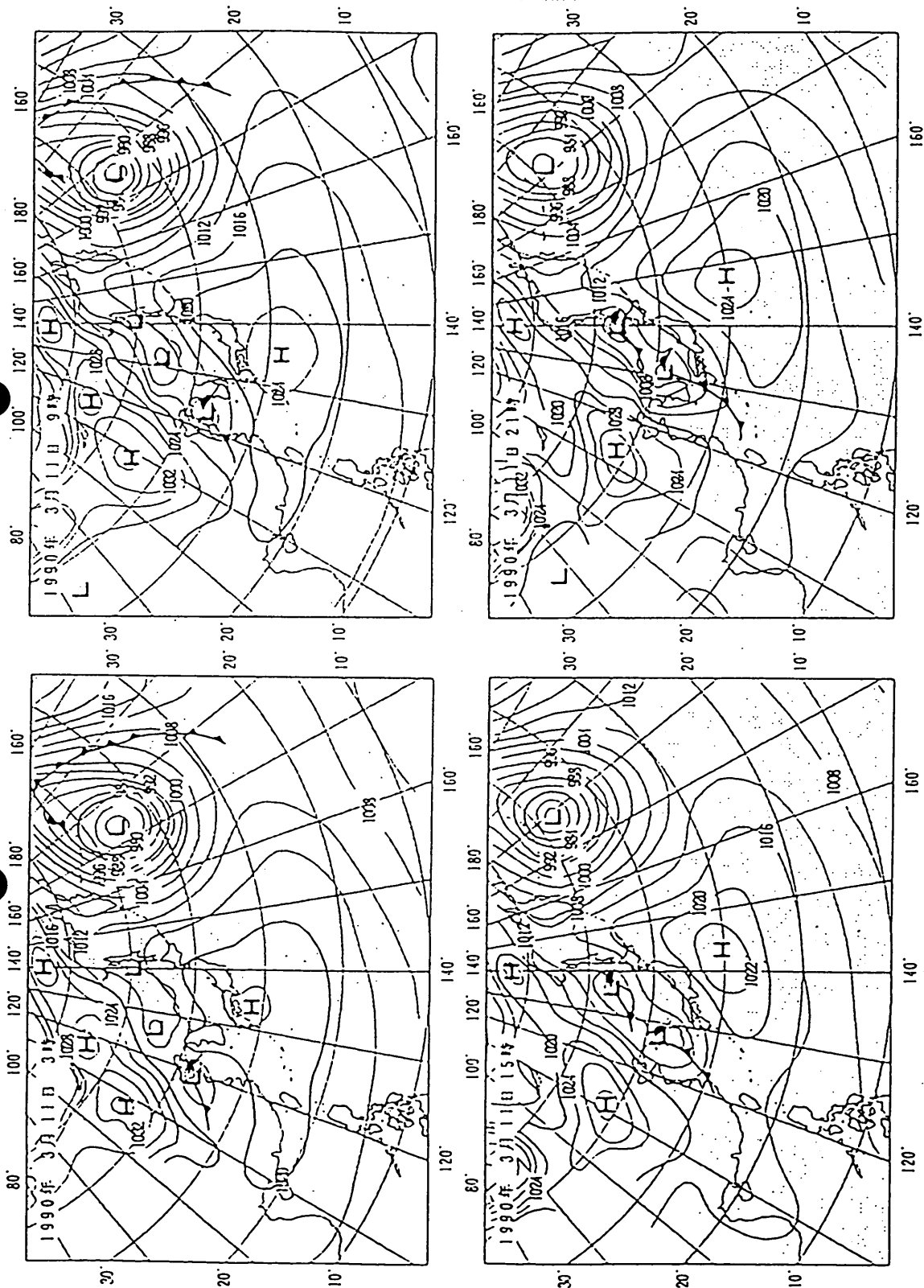


図-12(4) 擾乱時の代表天気図 (1990年3月11日)



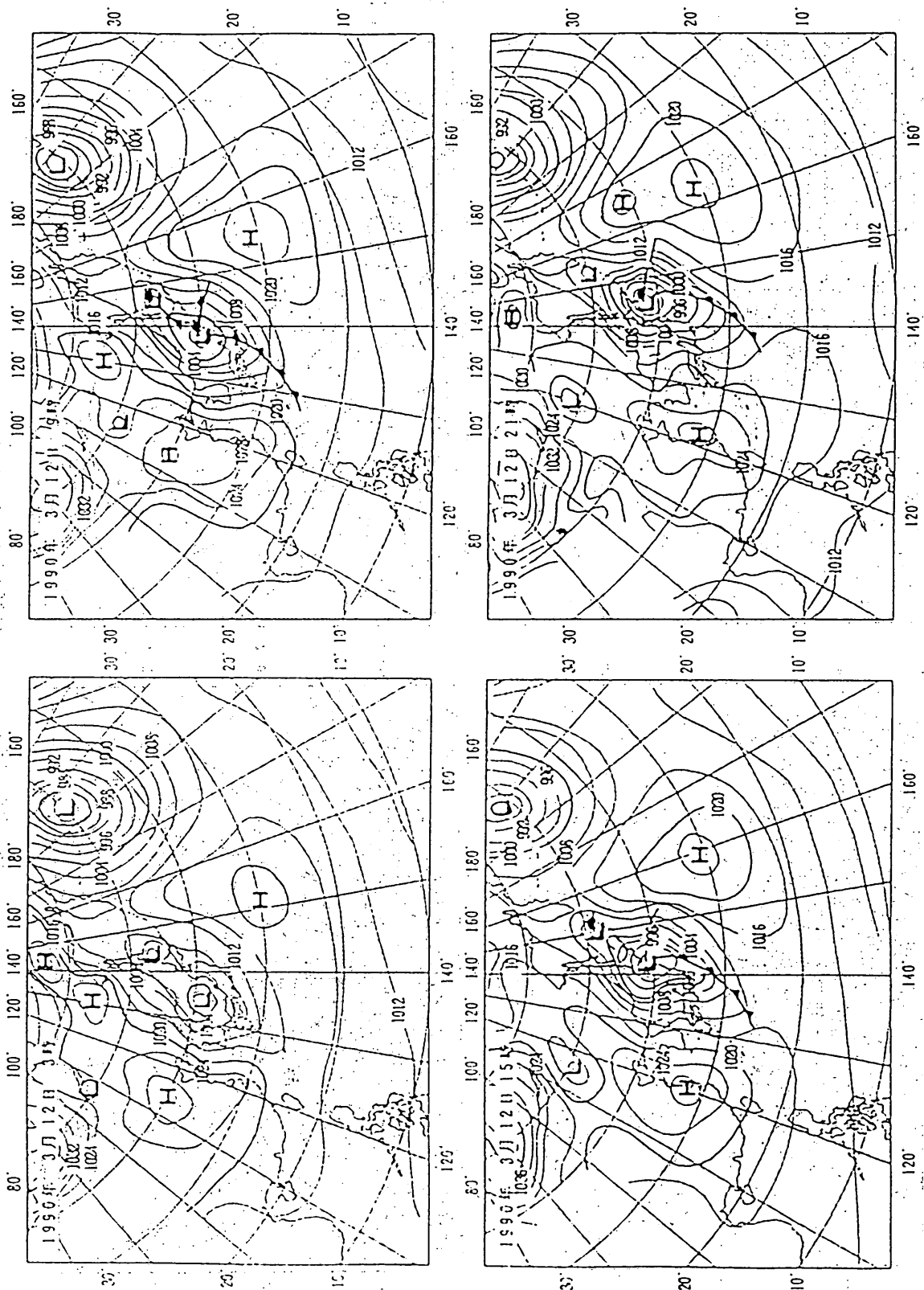
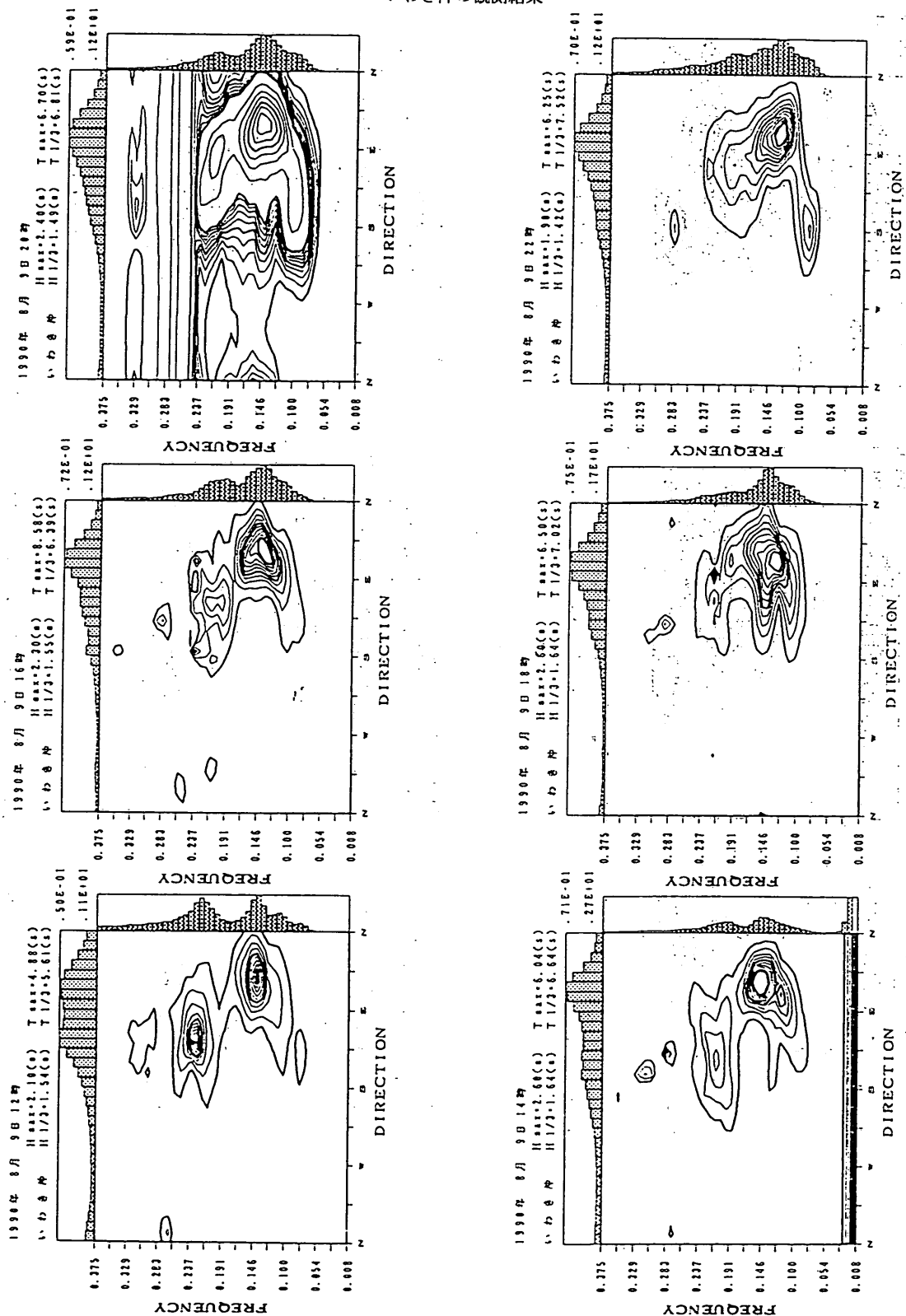
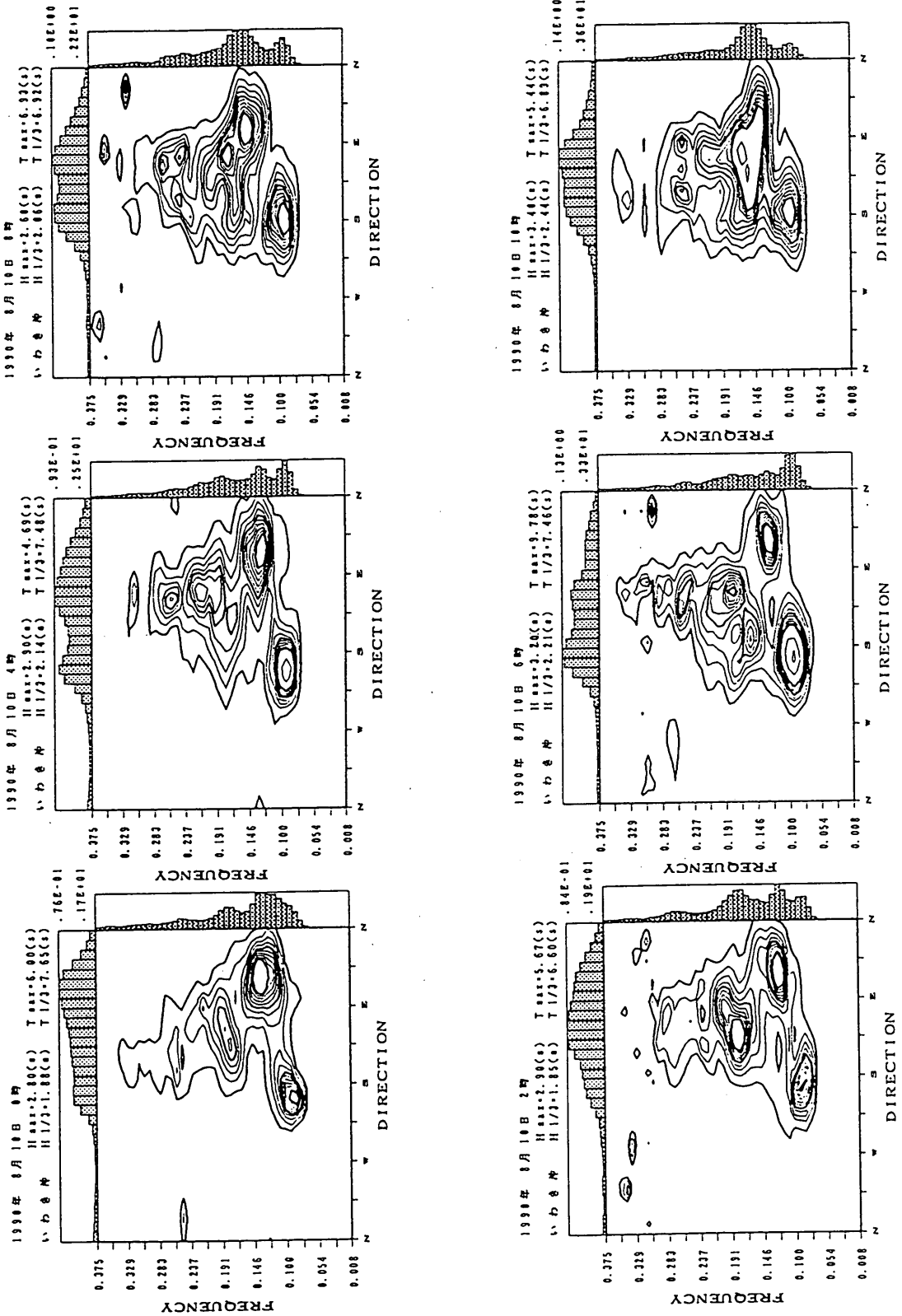


図-12(4) 擾乱時の代表天気図 (1990年3月12日)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —



図—11(5) 攪乱時の代表方向スペクトル (1990年8月9日午後)



図一(11)(5) 攪乱時の代表方向スペクトル (1990年8月10日午前)

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)  
 — いわき沖の観測結果 —

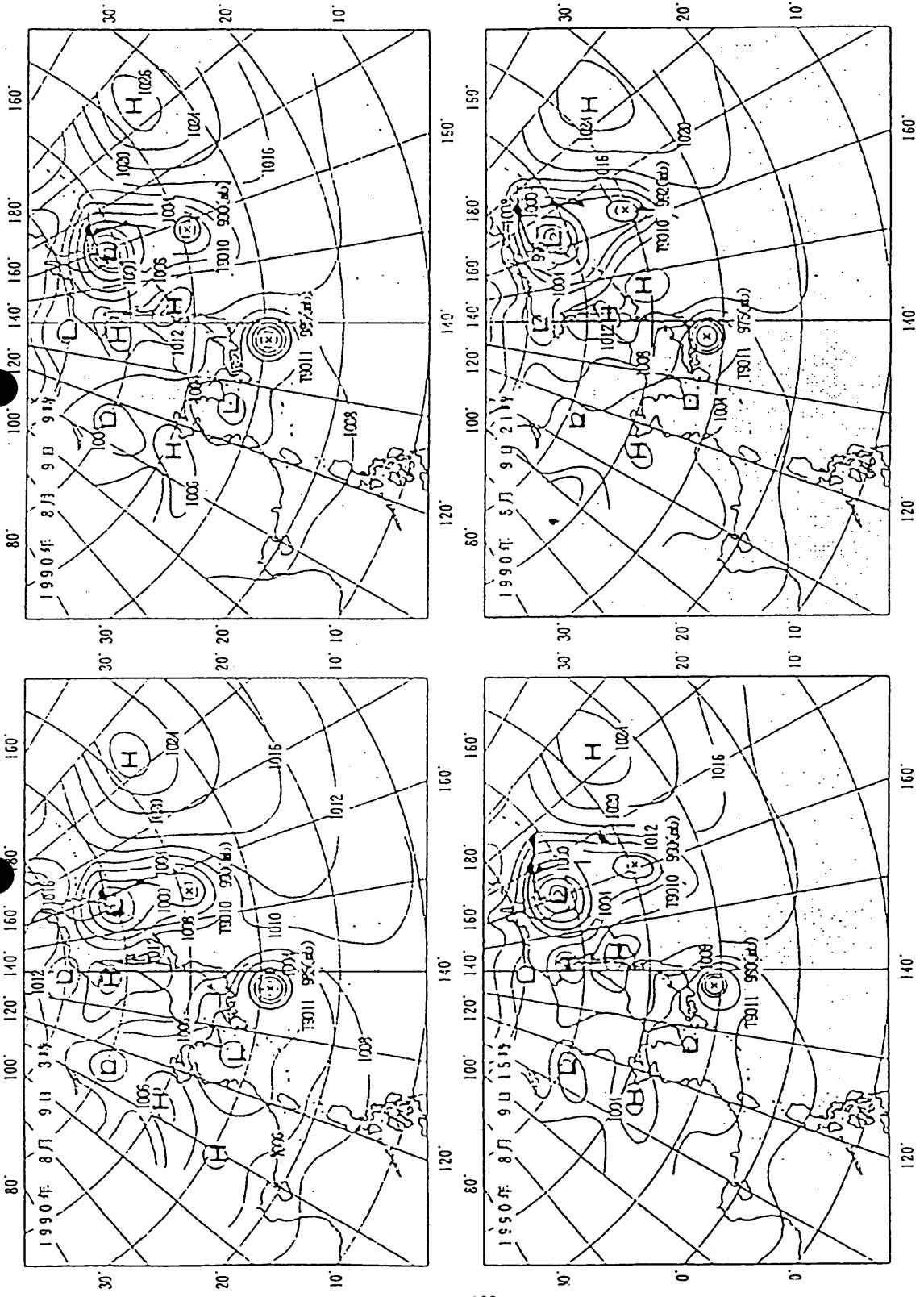


図-12(5) 擾乱時の代表天気図 (1990年8月9日)

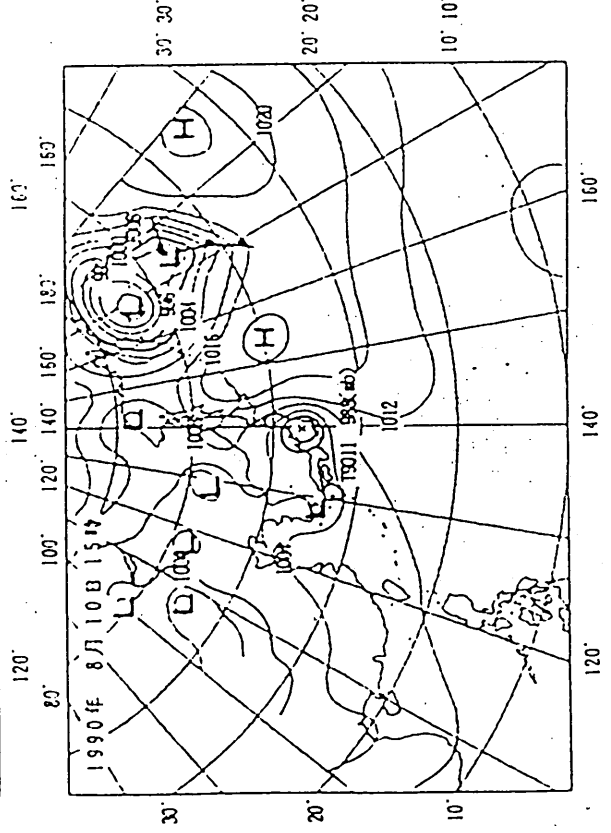
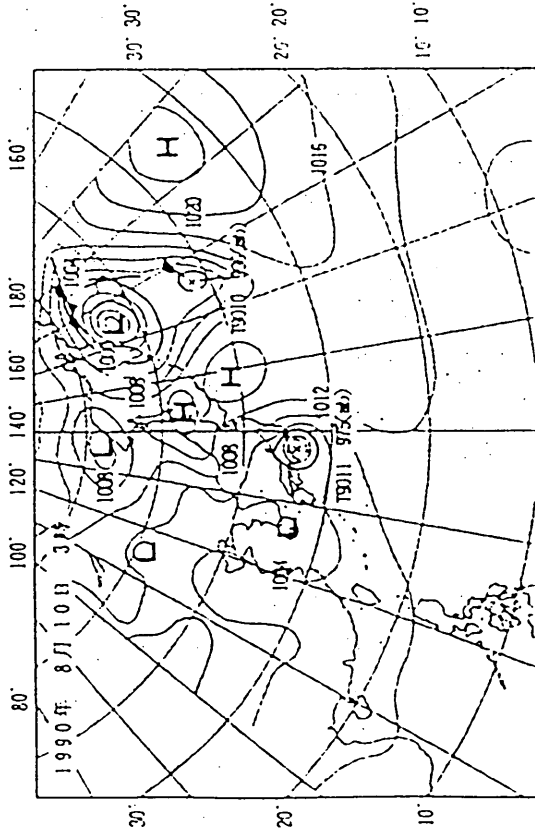
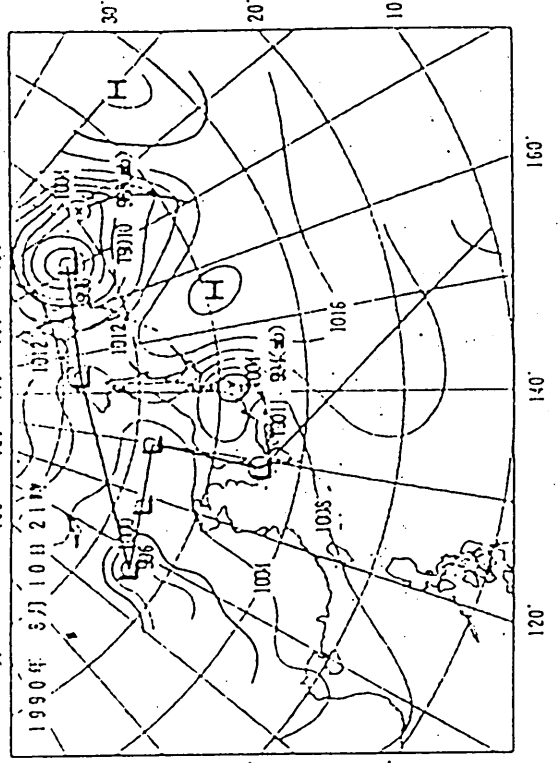
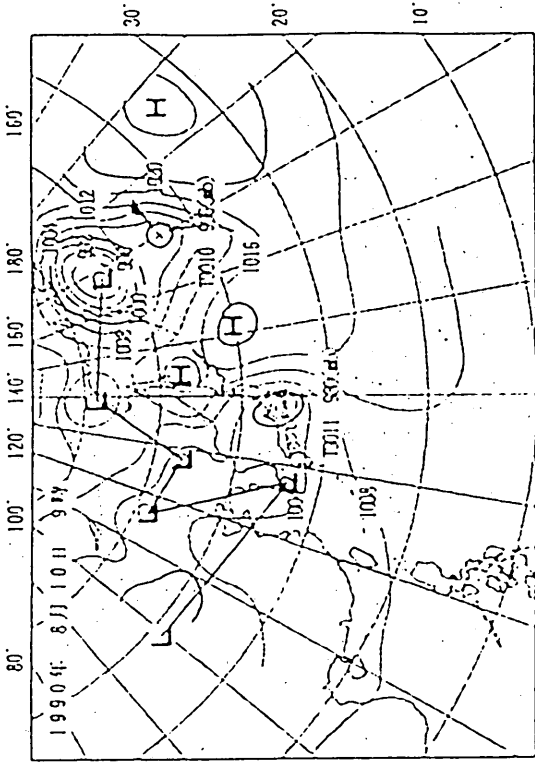


図-12(5) 攪乱時の代表天気図(1990年8月10日)

## 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

### 謝 辞

この研究に用いたいわき沖および小名浜の観測データは定常観測を担当する小名浜港工事事務所をはじめとする第二港湾建設局の関係各機関の不断的努力により取得されたものである。ここに記し、改めて謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) たとえば、高橋智晴・副島 毅・中井徹也・佐々木弘・菅原一晃：波浪に関する拠点観測年報 (昭和45年)，港湾技術研究所資料，No.137, 1972, 276p.  
そのほか、昭和46年～昭和54年の波浪に関する拠点観測年報については、それぞれ港湾技術研究所資料 No.158, No.178, No.209, No.233, No.258, No.282, No.311, No.332 および No.373 を参照。
- 2) たとえば、高橋智晴・広瀬宗一・菅原一晃・橋本典明：沿岸波浪観測年報 (昭和55年)，港湾技術研究所資料，No.417, 1982, 835p.  
そのほか、昭和56年～昭和63年の沿岸波浪観測年報については、それぞれ港湾技術研究所資料 No.445, No.480, No.517, No.545, No.574, No.612, No.642, No.666 を参照。
- 4) 小舟浩治・亀山 豊・永井紀彦・菅原一晃・橋本典明：沿岸波浪観測年報 (1989)，港湾技術研究所資料，No.712, 1991, 262p.
- 5) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正・平野隆幸：沿岸波浪観測年報 (1990)，港湾技術研究所資料，No.721, 1992, 274p.
- 6) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1991)，港湾技術研究所資料，No.745, 1993, 274p.
- 7) たとえば、永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井正：全国港湾海洋波浪観測20か年統計 (NOWPHAS 1970～1989)，港湾技術研究所資料，No.744, 1993, 246p.
- 8) 永井紀彦・冷水康悦・後藤智明：大水深波浪観測データによる波浪推算法の検証，第37回海岸工学講演会論文集，土木学会，1990, pp.175～179.
- 9) 永井紀彦・橋本典明・浅井 正・八木橋貢・鶴飼亮行・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，土木学会，1992, pp.126～130.
- 10) 永井紀彦・橋本典明・浅井 正・菅原邦彦・久高将信：いわき沖で観測された方向スペクトルの出現特性，海岸工学論文集，第39巻，土木学会，1992, pp.166～170.
- 11) 合田良実・永井康平：波浪の統計的性質に関する調査・解析，港湾技術研究所報告，第13巻第1号，1974, pp.1～37.
- 12) 山口正隆・土屋義人：発達過程にある風波の方向スペクトル特性，第27回海岸工学講演会論文集，1980, pp.99～103.
- 13) 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.
- 14) 合田良実：共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討，港湾技術研究所報告，第20巻第3号，1981, pp.53～92.
- 15) Longuet-Higgins, M. S. : On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. Marine Res., Vol. IX, No.3, 1952, pp.245～266.

補章A. 方向スペクトルの推定方法とその特性

A. 1 海の波の記述と波向の定義

(1) 不規則波の記述方法

通常、海の波の記述を行う場合、無数の微小振幅の正弦波の重ね合わせとして取り扱う。これは不規則波の表示の第1近似としては有効な方法であり、数学的取扱いも比較的容易であることによるものである。また、種々の統計理論に適用できる利点を有しているため、本論文もこの考えにしたがって議論を行うものとする。

いま、平均水面からの波面の上昇  $\eta$  を  $\eta = \eta(x, y; t)$  で表すと、これは式(1)のように表現できる。

$$\eta(x, y; t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n + \omega_n t + \omega_n) \quad (1)$$

ここで、 $x, y$ : それぞれ水平座標、 $t$ : 時刻、 $a_n, k_n, \omega_n$  および  $\theta_n$ : それぞれ成分波の振幅、波数、角周波数および成分波の来襲する方向と  $x$  軸のなす角、 $\omega_n$ : 位相遅れ角であり  $0 \sim 2\pi$  の間に等密度でランダムに分布している。このとき、微小振幅波の仮定から、波数  $k_n$  と角周波数  $\omega_n$  は、分散関係式(2)を満足する。

$$\omega_n^2 = g k_n \tanh k_n h \quad (2)$$

ここで、 $h$ : 水深、 $g$ : 重力加速度である。したがって、各成分波の波浪諸元は、波数あるいは周波数のどちらかと波向の関数で表現できることになり、例えば波のエネルギー-密度関数を表す次の諸量に対して式(3)のように書き表すことができる。

$$\begin{aligned} \sum_k^{k+\delta k} \sum_{\theta}^{\theta+\delta \theta} \frac{1}{2} a_n^2 &= S_k(k, \theta) \delta k \delta \theta \\ &= S_{\omega}(\omega, \theta) \delta \omega \delta \theta \\ &= S(f, \theta) \delta f \delta \theta \end{aligned} \quad (3)$$

これらの関数  $S_k(k, \theta)$ ,  $S_{\omega}(\omega, \theta)$  あるいは  $S(f, \theta)$  は波の方向スペクトル密度関数あるいは単に方向スペクトルと呼ばれている。

(2) 波向代表量

不規則波の表示方法の定義から明らかなように、来襲する波の方向は1つに特定できるものではなく、各成分波毎に異なる散らばりをもって分布している。そこで、Longuet-Higgins<sup>1)</sup> は不規則波に対する統計解析の方法から導かれる平均的な波向とその分布の幅を用いて、来襲する波の代表波向と方向集中度を定義している。

波数に関する直交座標系を用いて方向スペクトルを新たに式(4)のように定義し直す。

$$\sum_k^{l+\delta l} \sum_m^{m+\delta m} \frac{1}{2} a_n^2 = E(l, m) \delta l \delta m \quad (4)$$

ここで、

$$l = k \cos \theta, \quad m = k \sin \theta$$

$$k = \sqrt{l^2 + m^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(m/l)$$

この  $E(l, m)$  に対し、座標軸の原点に関して  $\theta$  だけ回転させた新しい座標軸 ( $l', m'$ ) を考える。このとき、 $l'$  軸に関する  $p$  次モーメント  $M_p(\theta)$  は式(5)のようになる。ただし、 $E(l, m)$  の値は回転に対して、不変であることに注意する。

$$\begin{aligned} M_p(\theta) &= \int E_{\theta}(l') l'^p dl' \\ &= \iint E(l', m') l'^p dl' dm' \\ &= \iint E(l, m) (l \cos \theta + m \sin \theta)^p dl dm \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $E_{\theta}(l') = dl' \int E(l', m') dm'$  であり、 $E(l, m)$  の  $l'$  軸への射影を意味している。同様に、 $E(l, m)$  の  $(p, q)$  次モーメント  $M_{pq}$  は式(6)のようになる。

$$M_{pq}(\theta) = \iint E(l, m) l^p m^q dl dm \quad (6)$$

式(6)を用いて、1次モーメントを計算すると式(7)が得られる。

$$\begin{aligned} M_1(\theta) &= M_{10} \cos \theta + M_{01} \sin \theta \\ &= \sqrt{M_{10}^2 + M_{01}^2} \cos(\theta - \bar{\theta}) \\ &= \bar{k} M_{10} \cos(\theta - \bar{\theta}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(M_{01}/M_{10}),$$

$$k = \sqrt{l^2 + m^2}, \quad \bar{l} = M_{10}/M_{00}, \quad \bar{m} = M_{01}/M_{00}$$

したがって、 $M_1(\theta)$  は  $\theta = \bar{\theta}$  のとき最大値  $kM_{00}$  をとる。このときの  $\theta$  方向の平均波数が  $\bar{k}$  であり、 $(\bar{l}, \bar{m})$  は  $E(l, m)$  の重心座標を示している。 $\theta$  はこの  $(\bar{l}, \bar{m})$  の座標原点に対する方向を示しており、このような意味から、 $\theta$  は平均波向 (mean direction) と呼ばれている。

2次モーメントについても、同様に計算すると式(8)のようになる。

$$\begin{aligned}
 M_2(\theta) &= M_{20} \cos^2 \theta + 2 M_{11} \cos \theta \sin \theta \\
 &+ M_{10} \sin^2 \theta \\
 &= \frac{1}{2} (M_{20} + M_{02}) \\
 &+ \frac{1}{2} \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2} \\
 &\times \cos 2(\theta - \theta_p)
 \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2 M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right)$$

式(8)から、 $M_2(\theta)$  は  $\theta = \theta_p \pm n\pi$  のときに最大値をとる。このような波向  $\theta_p$  を、主波向 (principal direction) と呼ぶ。定義式から明らかなように主波向は  $\pm\pi$  方向の差、すなわち、波の進行・逆行の区別をすることができない。

また、定義式より  $M_2(\theta)$  は波数の2乗の積分であるから、 $M_2(\theta)/M_{00}$  は波数の分散を表す量となる。このとき、 $\theta = \theta_p$  の方向では最も波の峰の分布が密になり、これに対し、 $\theta = \theta_p \pm \pi/2$  の方向では最も波の峰の分布が粗となる。そこで、それぞれの場合の分散の比を用いて式(9)のようなパラメータ  $\gamma$  を定義し、波峰長パラメータ (long-crestedness) と呼んでいる。

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \left\{ \frac{(M_2)_{\min}}{(M_2)_{\max}} \right\}^{1/2} \\
 &= \left\{ \frac{(M_{20} + M_{02}) - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2}}{(M_{20} + M_{02}) + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2}} \right\}^{1/2} \tag{9}
 \end{aligned}$$

また、合田<sup>2)</sup> は波峰長パラメータ  $\gamma$  が2方向波浪系に対して2つの波群の波向の差を表す指標になりえないことを指摘し、これにかわるものとして下の式に示すパラメータ  $\theta_s$  を新たに提案し、平均分散角 (mean spreading angle) と呼んだ。

$$\begin{aligned}
 \theta_s &= \tan^{-1} (\tau / \bar{k}) \\
 &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{M_{00}} \sqrt{M_{10}^2 M_{20} - 2 M_{10} M_{01} M_{11} + M_{10}^2 M_{02}}}{M_{10}^2 + M_{01}^2} \right\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 r^2 &= \frac{1}{M_{00}} \iint E(l, m) \frac{(\bar{m}l - \bar{l}m)^2}{\bar{l}^2 + \bar{m}^2} dl dm \\
 &= \frac{\bar{m}^2 M_{20} - 2 \bar{l} \bar{m} M_{21} + 2 \bar{l}^2 M_{02}}{(\bar{l}^2 + \bar{m}^2) M_{00}} \\
 &= \frac{M_{01}^2 M_{20} - 2 M_{10} M_{01} M_{11} + M_{02}}{(M_{10}^2 + M_{01}^2) M_{00}}
 \end{aligned}$$

$r$  は方向スペクトルの主軸からの分散距離を示しており、 $\bar{k}$  を用いて無次元化を行っている。

現在、一般的に使われている波向の指標はおおむね上記の4つであるが、これらはすべてスペクトルの2次までのモーメントから導かれ、分布関数の重心あるいは主軸とこれに対する分散などの観点から定義した量である。したがって、方向スペクトルの分布形状が歪んでいる場合や2方向系の波浪に対しては、適用するときに注意が必要である。しかし、十分に方向集中度の大きな (すなわち long-crested な) 場合にはその差異が微小であるため、沿岸域の浅海変形等を影響を受けた後の波浪についてはほぼ妥当な値を示すとしてもよい。そのため、現在でもこれらの値は波向代表量として一般的に用いられている。

## A. 2 方向分布関数

### (1) 方向分布関数の定義

前節に示したように、波向代表量は方向スペクトルの1次または2次のモーメントから定まるパラメータであるため、そこから得られる情報量には限りがある。したがって、波向についてより詳細な検討を行うためには、方向スペクトルを直接吟味する必要がある。

ここで、これまでの研究から周波数スペクトルについてはいろいろな知見が得られており、種々の標準形が提案されている。これらの知識を生かすために、式(11)のように周波数スペクトルとある分布関数の積の形で方向スペクトルを定義し、周波数スペクトルを方向について分布させるのが一般的な取扱い方である。

$$S(f, \theta) = S(f) G(\theta | f) \tag{11}$$

したがって、方向分布関数を方向について積分すると1になる。すなわち、方向スペクトルを方向について積分すると周波数スペクトルになるということである。

$$\int G(\theta | f) d\theta = 1$$

または

$$\int S(f, \theta) d\theta = S(f) \tag{12}$$



この関数  $G(\theta | f)$  を方向分布関数と呼ぶ。方向分布関数は周波数  $f$  の成分がもつ波のエネルギーの方向  $\theta$  への分布を表しているが、その形は一般に周波数によって異なるので、 $f$  と  $\theta$  の関数として定義される。この関数形については種々のものが提案されており、その代表的なものは以下に示すとおりである。

(2) 光易型方向分布関数<sup>3),4)</sup>

光易らは、クローバブイ式波浪計を用いた詳細な観測結果にもとづいて、方向分布関数を提案した。この原式は風波を対象として方向集中度  $S$  を風速  $U$  に関係づけているが、工学的な使いやすさから合田・鈴木は原式を方向集中度の最大値  $S_{max}$  を主パラメータとして式(13)のような形に書き換えた。

$$G(\theta | f) = G_0 \cos^{2s} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (13)$$

ただし、 $G_0$  は  $G_0 = \left[ \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos^{2s}(\theta/2) d\theta \right]^{-1}$  で定義される定数であり、 $\theta_{min} = -\pi$ 、 $\theta_{max} = \pi$  のときは式(14)の値となる。

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(S+1)}{\Gamma(2S+1)} \quad (14)$$

また、方向集中度パラメータ  $S$  は周波数  $f$  の関数であり、 $S$  の最大値  $S_{max}$  を用いて式(15)のように表される。

$$\begin{aligned} S &= S_{max} (f/f_p)^5 && : f \leq f_p \\ &= S_{max} (f/f_p)^{-2.5} && : f \geq f_p \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $f_p$  : 周波数スペクトルのピーク周波数 ( $= 1/(1.05 T_{1/3})$ ) である。

前述のように、光易型方向分布関数は、風波の方向スペクトルの標準形として提案された式であり、方向集中度は当初風速の関数として定義されていたが、工学的な取扱いの簡便さから  $f$  と  $S_{max}$  による関数として書き換えられている。この関数は  $S_{max}$  を適当に選ぶことにより、うねりの場合の方向スペクトルについてもよく表現することができるのでその適用範囲の広さから一般によく用いられている。ただし、この場合に与えられる  $S_{max}$  の値は方向スペクトルの検討結果から求められた値ではないので、今後、厳密な検討を行うことによりその妥当性を検証していく必要がある。

(3) その他の方向分布関数

山口ら<sup>5)</sup> は現地の波浪観測データに対して、円正規分布 (Circular Normal Distribution) をあてはめ、その適合度等について検討を行っている。これは Borg-

man<sup>6)</sup> が最初に提案した関数形であり、式(16)に示されるとおりである。

$$G(\theta | f) = \frac{\exp \{ a \cos(\theta - \theta_0) \}}{2\pi I_0(a)} \quad (16)$$

ここで、 $a$  : 円正規分布関数の形状母数、 $\theta_0$  : 波の主方向、 $I_0$  : 0 階の第 1 種変形 Bessel 関数である。円正規分布は理論上エントロピーを最大にするエネルギーの方向分布として与えられる。しかしながら、その関数形は光易型方向分布関数とはほぼ同じ形状をとり、また、円正規分布に用いられる方向集中度のパラメータは方向集中度パラメータ  $S$  と線形な関数を用いて十分近似できることが明らかにされている。そのため、今回の解析では、光易型方向分布関数のみを扱えば十分であるとみなした。

これに対し、2 方向系の波浪に対する方向分布関数として、例えば、Hassellmann et al.<sup>7)</sup> は、式(17)の関数形をあてはめることにより、現地の海象特性について検討を行っている。

$$G(\theta | f) = \lambda M(\theta, S_1, \alpha_1) + (1 - \lambda) M(\theta, S_2, \alpha_2) \quad (17)$$

ここで、

$$M(\theta, S, \alpha) = N(S) \cos^{2s} \left( \frac{\theta - \alpha}{2} \right)$$

$$N(S) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(S+1)}{\Gamma(2S+1)}$$

ただし、 $S$  : 波の方向集中度を表すパラメータ、 $\alpha$  : 波の主方向、 $\Gamma(x)$  : Gamma 関数である。ただし、この方法を用いて方向スペクトルを推定する場合、5 つの未知数に対して条件式が 4 つしか存在しないため、実際の推定を行う場合には、式(18)の条件式を新たに付加して解析を行うことを Hassellmann et al. は提案している。

$$(s_1 - s_2)^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

したがって、条件式(18)を用いて計算された 2 つの方向分布関数は一方の方向集中度が極端に大きくなったり小さくなったりしないので、互いに類似した形状をもつ方向分布が得られるという計算上の利点がある。Hassellmann et al. の研究では吹走距離が有限な海域で発生した風波を対象としているため、それぞれの観測データはよく似た性質をもつことが予想され式(18)の仮定はほ

ば妥当であると思われる。しかし、今回対象とした海域では性質の異なる複数の気象擾乱が波浪の要因となっており、風波とうねり性の波浪が混在している場合についても検討を行っているため、条件式(18)を用いて解析を行う場合には注意が必要である。

また、広瀬<sup>9)</sup>は、二方向にピークをもつ方向スペクトルを解析するために、式(19)に示す wrapped normal 分布を重ね合わせることににより検討を行っている。

$$p(\theta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^n \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\theta - \mu - 2\pi k)^2}{\sigma^2}\right) \quad (19)$$

その他、方向関数として最初に用いられたものとしては Arthur<sup>9)</sup>の示唆による式(20)の形式のものがある。

$$G(\theta|f) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta \quad \left(|\theta| < \frac{\pi}{2}\right) \\ = 0 \quad \left(|\theta| > \frac{\pi}{2}\right) \quad (20)$$

この関数は波浪推算法のPNJ法において採択されたことによって著名であり、関数形が単純なこともあって使用される場合が多い。ただし、観測によって裏付けられたものではないようである。

また、海面のステレオ写真を撮影して解析した等高線図から方向スペクトルを求めたものとして、式(21)のS WOP(「ステレオ波浪観測計画」の英文の頭文字をつづった名称)の方向関数<sup>10)</sup>もよく知られている。

$$G(\theta|f) = \{1 + a \cos 2\theta + b \cos 4\theta\} \\ \left(|\theta| < \frac{\pi}{2}\right) \\ = 0 \quad \left(|\theta| > \frac{\pi}{2}\right) \quad (21)$$

ここで、

$$a = 0.50 + 0.82 \exp(-f^2/2)$$

$$b = 0.32 \exp(-f^2/2)$$

$$f = 2\pi U_{10}/g$$

この方向関数形も光易型方向分布関数と同様に、周波数の高い成分波は方向に関する集中度が低い特性をもっている。

### A. 3 方向スペクトルの推定方法

方向スペクトルの推定方法としてこれまでにいくつか

の方法が提案されている。この場合、方向スペクトルの推定には最低限3成分の波浪観測値が必要である。そのため、高密度の波浪観測を実施することが不可欠となるが、このようなデータの取得されている例は現在でも非常に少ない。そのため、実測値を用いた推定方法の検証もあまりなされていない実状にある。これはまた従来の観測機器の性能では実測値を用いて検証を行う場合、観測誤差が推定方法による影響と比べて無視できない程度であったことにも起因している。そのほかにも、計算上の問題として、方向スペクトルの定義式から明らかなように海洋波は周波数と方向について無数の正弦波の重ね合わせにより構成されるが、これに比べて非常に少ない有限個の観測値から推定を行わなければならないという問題も有している。上記のような理由から、多くの推定方法では便宜的に何らかの仮定や近似を設けているが、簡便性から現在でもよく用いられている方法もいくつかある。これらの方法は、その仮定や近似の方法により計算の簡便性や分解能などの面でそれぞれ異なる特徴をもっている。したがって、推定される方向スペクトル形状にも推定方法による特徴が現れるので、以下に推定方法の影響を示し、検討を行う際の参考としたい。

#### (1) LHM (Longuet-Higgins Method)<sup>11)</sup>

Longuet Higginsは、方向分布関数の関数形を式(22)のFourier級数を用いて定義した。

$$G(\theta|f) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} \{A_k(f) \cos n\theta \\ + B_k(f) \sin n\theta\} \quad (22)$$

定義より直ちに2次までのFourier級数についてその係数の値は式(23)のように求められる。

$$A_1(f) = G_{12}(f) / \pi k C_{11}(f)$$

$$B_1(f) = Q_{13}(f) / \pi k C_{11}(f)$$

$$A_2(f) = \{C_{22}(f) - C_{33}(f)\} / \pi k^2 C_{11}(f)$$

$$B_2(f) = 2 C_{23}(f) / \pi k^2 C_{11}(f) \quad (23)$$

ここで、 $C_{mn}(f)$ 、 $Q_{mn}(f)$ ：それぞれ、周波数 $f$ に対する $(m, n)$ 次のコスペクトルおよびクワドラチャスペクトルである。LHMは3成分の観測データが得られた場合に、方向スペクトルを簡便に推定することができる方法である。しかしながら、方向スペクトルの方向集中度を正弦波の重ね合わせにより表現しているため、真のピークから $\pi/n$ 離れたところに見かけ上のピークが現れたり、ピークの分裂が生じることがある。同様の理由

からさらに高次の Fourier 級数の成分が含まれている場合には、各成分の値が過大に評価される可能性がある。そのため、式(4)のような重みを用いて方向スペクトルを計算することを提案している。

$$G(\theta|f) = \frac{1}{2\pi} + \frac{2}{3} \{A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta\} + \frac{1}{6} \{A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta\} \quad (4)$$

(2) DFT 法 (Direct Fourier Transformation Method)<sup>12)</sup>

DFT 法は、Barber によって提案された方法であり、直接フーリエ変換法とも呼ばれる。この方法は、クロススペクトルと波数・周波数スペクトルの関係式を利用して、式(5)のように両辺の逆 Fourier 変換から方向スペクトルを推定する方法である。

$$S(k, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \Phi(x, \omega) \exp(ikx) dx \quad (5)$$

しかし、実際に測得可能な波浪諸元は離散量であるために、式(5)の積分を実際に行うことはできない。そこで、式(5)を級数和で置き換えた式(6)を用いて方向スペクトルの推定値を求める。

$$S(k, \omega) = a \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{mn}(\omega) \exp\{ik(x_n - x_m)\} \quad (6)$$

ここで、 $a$  : 方向スペクトルの正規化条件を満足するための無次元定数である。これを行列表示すると式(7)となる。

$$S(k, \omega) = aD(k, \omega)^T \Phi(\omega) D(k, \omega) \quad (7)$$

DFT 法の基本的な考え方は LHM と同じであるが、DFT 法では 4 成分以上の高密度観測が行われている場合にも適用ができる。ただし、推定された方向スペクトルは LHM による推定結果と同様な性質をもつため、取扱いには注意が必要である。

(3) 分布関数あてはめ法

方向スペクトルについてあらかじめ A. 2 で示したような方向分布関数形を仮定して、方向スペクトルの形状をいくつかのパラメータを用いて表現する。そして、仮定した方向分布関数に実際のデータをあてはめてパラメータの同定を行い、方向スペクトルの推定値を求めるものである。A. 3 (1), (2) に示された方法も Fourier 級数と仮定した方向分布関数へのあてはめと考えれば、こ

の方法に含むことができる。

これらの方法は、方向分布関数のもつ情報を少数のパラメータで代表させているために、一般に推定が比較的簡単である。さらに、方向分布関数のパラメータのもつ物理的意味がはっきりしている場合には、方向スペクトルの特性を検討する上で取扱いが容易となる長所をもつ。しかしながら、これらのパラメータが表現できる情報量には限りがあるために、複数個のピークがみられる方向スペクトルや主軸に対して非対称な方向分布形状をもつものに対しては、正確な推定が行うことができない場合がある。また、方向分布関数形を仮定して推定を行っているために、エネルギー分布のないところに関数形に依存した見かけ上のピークが現れることもある。したがって、これらの方法を用いる場合には、あらかじめ、方向分布関数形について十分検討を行うておく必要がある。

(4) EMLM (Extended Maximum Likelihood Method)<sup>13)</sup>

磯部らは、最尤法を用いた方向スペクトルの推定方法に対し、波高計アレイ以外の波動量にも適用できるように拡張を行った。波数・周波数スペクトルの推定値を形式的にクロススペクトルの線形結合で表されるものとして式(8)で表す。

$$S(k, \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn}(k, \omega) \Phi_{mn}(\omega) \quad (8)$$

これを、波動量のクロススペクトル表示の定義式に代入すると式(9)が得られる。

$$S(k, \omega) = \int S(k, \omega) w(k, k') dk' \\ w(k, k') = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn}(k) \\ \times H_m(k', \omega) H_n^*(k, \omega) \\ \times \exp\{-ik'(x_n - x_m)\} \quad (9)$$

ここで、 $H_m(\omega)$  : 水面形から波動量への伝達関数である。EMLM ではウインドウ関数  $w(k, k')$  をデルタ関数に近づける操作を近似的に行い、波数・周波数スペクトルの推定式として式(8)のように与えている。

$$S(k, \omega) = \frac{\kappa}{\sum \sum \Phi_{mn}^{-1}(\omega) H_m^1(k', \omega) H_n(k, \omega) \exp\{-ik'(x_n - x_m)\}} \quad (10)$$

ここで、 $\Phi_{mn}^{-1}(\omega) : \Phi_{mn}(\omega)$ から構成される行列  $\Phi(\omega)$  の逆行列の  $mn$  成分、 $\kappa$  : 比例定数であり方向分布関数の正規化条件を満足するように決められる。

EMLM は、定義から明らかなようにあらかじめ方向分布関数を与えなくても直接方向分布関数を推定できる方法である。したがって、任意の形状の方向分布関数に適用できる長所をもつ。しかしながら、クロススペクトルの逆行列の逆数の積を用いて方向スペクトルを与えているため、方向スペクトルのピーク部分で計算誤差が大きくなるためにエネルギーピーク近傍でかなり激しい振動を生じ、見かけ上のピークが生じる場合がある。EMLM には以上のように改良しなければならない点もいくつかあるが、計算が容易であるため一般によく使われている。

(5) MEP (Maximum Entropy Principle)<sup>14)</sup>

橋本は3成分の観測波動量から方向スペクトルを推定する場合に対し、観測波動量のもつ不確定さの尺度としてエントロピーの概念を導入して、これらのもつ情報量が最大になるように推定を行うことを提案している。いま、方向分布関数  $G(\theta|f)$  が確率密度関数と同じ性質をもつことを利用すると、このエントロピー  $H$  は式(8)で与えられる。

$$H = - \int_0^{2\pi} G(\theta|f) \ln G(\theta|f) d\theta \quad (8)$$

したがって、エントロピー  $H$  を最大にする  $G(\theta|f)$  を求めてやればよい。この問題をラグランジュの未定乗数法を用いて解くことにすると、ラグランジュ関数は式(9)で与えられる。

$$L = - \int G(\theta|f) \ln G(\theta|f) d\theta + (\lambda_0 - 1) \{1 - \int G(\theta|f) d\theta\} + \sum_{i=1}^4 \lambda_i \{ \beta_i - \int G(\theta|f) \alpha_i(\theta) d\theta \} \quad (9)$$

ここに、 $\lambda_i (i=0, \dots, 4)$  はラグランジュの未定乗数である。式(9)の最大値を与える  $G(\theta|f)$  は、条件式(9)を連立させて解くことにより与えられる。

$$\frac{\delta L}{\delta G(f, \theta)} = - \{1 + \ln G(f, \theta)\} - (\lambda_0 - 1) - \sum_{i=1}^4 \lambda_i \alpha_i(\theta) = 0 \quad (10)$$

これを満足するように、 $G(\theta|f)$  の最大エントロピー推定値  $\bar{G}(\theta|f)$  を求めると、式(10)のようになる。

$$\bar{G}(\theta|f) = \exp \left\{ -\lambda_0 - \sum_{i=1}^4 \lambda_i \alpha_i(\theta) \right\} \quad (11)$$

MEP は比較的簡単に高精度の方向スペクトルが推定できる長所を有している。3成分の観測波動量から十分な精度で方向スペクトルを推定できるため、比較的簡便な観測施設でも方向スペクトル観測を行うことができる。しかし、3成分の場合に対する適用例しか示されていないため、さらに高密度な波浪観測が行われている地点に対して直接適用することは困難であった。そのため、多成分の波動量が測得されている場合の方向スペクトルの推定にも適用できるように、拡張された推定モデルも提案されている<sup>15)</sup>。

(6) BDM (Bayesian Distribution Method)<sup>16)</sup>

近年、比較的多成分の波動量の同時観測が実施されるようになり、これらの情報を用いたより高精度の方向スペクトルの推定方法が必要とされるようになった。これに対し、橋本は、ベイズの定理を導入することによって精度の良い方向スペクトルを推定できる方法を提案している。ベイズの定理の基本的概念は式(12)に示すとおりであり、これは事後分布が事前分布にある尤度  $L(\theta)$  を乗じた形で表現できることを意味している。

$$p(\theta|x) = \frac{p(x|\theta) p(\theta)}{\int p(x|\theta) p(\theta) d\theta} = L(\theta|x) p(\theta) \quad (12)$$

ここで、 $x$  : データ、 $\theta$  : 母数とすると  $p(x|\theta), p(\theta), p(\theta|x)$  : それぞれ、モデル分布、事前分布および事後分布の確率密度関数と呼ばれる。この場合、事前分布をどのように選択するかが問題となるが、橋本は式(12)に示される赤池のベイズ型情報量基準 (Akaike's Bayesian Informaion Criterion)<sup>17)</sup> を用いて、この最小化により事前分布  $p_s(\theta)$  を決定することを提案している。

$$ABIC = -2 \ln \int p(x|\theta) p_s(\theta) d\theta \quad (13)$$

式(13)の ABIC を用いて実際に統計モデルによるデータ解析をする場合には、以下のようにとりおこなう。

いま、 $y$  を目的変数、 $x$  を説明変数のベクトルとし、両者の関係を式(14)のような線形回帰モデルで表現する。

$$y = x^t \alpha + \varepsilon \quad (14)$$

ここに、 $\alpha$  : 未知の係数ベクトル、 $\varepsilon$  : 平均0、未知の

分散  $\sigma^2$  の正規分布にしたがうランダム変数である。  $n$  組のデータ  $(y_i, x_i)$ ,  $(i = 1, \dots, n)$  が与えられると、  $\alpha$  の最尤推定値は

$$\sum_{i=1}^n |y_i - x_i \alpha|^2 = |y - X\alpha|^2 \quad (3a)$$

を最小にすることによって得られる。ここに、  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$ ,  $X = (x_1, \dots, x_n)^T$  であり、  $|\cdot|$  はユークリッドノルムである。

このような場合、モデルの適合度と推定値の滑らかさのバランスを考慮し、  $\alpha$  がある既知の値  $\alpha_0$  に近い、あるいは適当な行列  $D$  に対して  $|D(\alpha - \alpha_0)|^2$  が小さいと仮定することにより、一つの自然な推定法として式(3a)を最小にする  $\alpha$  をその推定値とする方法が考えられる。

$$|y - x\alpha|^2 + u^2 |D(\alpha - \alpha_0)|^2 \quad (3b)$$

しかしながら、この方法では  $\alpha$  の推定値は式(3b)中のパラメータ  $u$  の値に依存し、  $u$  の大小によって異なる  $\alpha$  が得られる。したがって、新たな問題として、  $u$  をどのように選択するかが問題となる。

赤池はこの問題に対して、式(3b)の最小化は式(4)の最大化に他ならないとして以下のように解決した。

$$\exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} |D(\alpha - \alpha_0)|^2 \right\} \\ \times \exp \left\{ -\frac{u^2}{2\sigma^2} |D(\alpha - \alpha_0)|^2 \right\} \quad (4)$$

すなわち、式(4)の第1項はデータ  $(y_i, x_i)$ ,  $(i = 1, \dots, n)$  が与えられた状況では  $\alpha$  と  $\sigma^2$  の尤度  $L(\alpha, \sigma^2 | y)$  に比例し、第2項は適当な基準化のもとではパラメータ  $\alpha$  の事前分布  $p(\alpha | u^2, \sigma^2)$  であると考えられる。したがって、式(3b)より、  $\alpha$  の事後分布は  $\alpha$  で規定されるモデルの尤度と  $\alpha$  の事前分布の積に比例することから、式(3b)の最小化により得られる  $\alpha$  の推定値は  $\alpha$  の事後分布の最頻値を推定値とすることに等しい。また、  $u^2$  は  $\alpha$  の事前分布を規定する超パラメータであるとみなされる。したがって、  $u^2$  と  $\sigma^2$  の選択基準としては、ベイズ型モデルの尤度を最大化することにより決定され、実際には式(4)で表される  $ABIC$  の最小化によって  $u^2$ ,  $\sigma^2$  を決定する。

$$ABIC = -2 \ln \int L(\alpha, \sigma^2 | y) \\ \times p(\alpha | u^2, \sigma^2) d\alpha \quad (4)$$

なお、尤度関数そのものを  $u^2$ ,  $\sigma^2$  で規定されるモデルと考えれば、  $ABIC$  最小化法はモデルのパラメータを最尤法によって決める方法であると解釈される。

BDM では観測誤差やクロススペクトルの推定誤差の影響が推定結果に現れにくく、推定された方向スペクトル形状は安定している。また、ノンパラメトリックな方向スペクトル推定法であるため推定を行う際に方向分布関数を仮定する必要がなく、方向スペクトルの推定値の形状がこれらの仮定に依存することもない。しかしながら、  $ABIC$  の最小化において直接的に  $u^2$ ,  $\sigma^2$  を求めることができないために計算時間が非常に長くなり、比較的多くのメモリを必要とするのが難点である。しかし、計算機の能力の向上とともに、これらの点は解消されつつある。 (1993年3月31日受付)

#### 参 考 文 献

- 1) Longuet-Higgins, M.S. : On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. Marine Res., Vol. IX, No. 3, 1952, pp. 245~266.
- 2) 合田良美 : 共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第20巻第3号, 1981, pp. 53~92.
- 3) Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi : Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Jour. Physical Oceanography, Vol. 5, 1975, pp. 750~760.
- 4) 合田良美・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, 港湾技術研究所資料, No. 230, 1975, 45p.
- 5) 山口正隆 : 方向スペクトル観測装置の分解能について(1) - 3成分流速計による方法 -, 愛媛大学工学紀要第三部(工学), 第9巻, 第3号, 1978, pp. 225~234.
- 6) Borgman, L. E. : Directional spectra model for design use, Tech. Report, HEL 1-12, 1969, pp. 1~29.
- 7) Hasselmann, D. E., M. Dunckel and J. A. Ewing : Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973, Jour. Physical Oceanography, Vol. 10, 1980, pp. 1264~1280.
- 8) 広瀬宗一 : 双峰型方向分布関数の推定法について, 第32回海岸工学講演会論文集, 1985, pp. 164~168.
- 9) Arthur, R. S. : Variability in direction of wave travel in ocean surface waves, Am. New York Acad. Sci., Vol. 51, No. 3, 1949, pp. 511~522.

沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)

— いわき沖の観測結果 —

- 10) たとえば, Kinsman, B. : Water Waves, Prentice-Hall, Inc., 1965, p.401 および pp.460~471.
- 11) Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith : Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of floating bouy, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall Inc., New Jewrsey, 1963, pp.111~136.
- 12) Barbar, N.F. : The directional resolving power of an array of wave detectors, Ocean Wave Spectra, Prentice Hall Inc., New Jewrsey, 1963, pp.137~150.
- 13) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司 : 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.
- 14) 橋本典明 : 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.
- 15) 橋本典明・永井紀彦・浅井正・菅原一晃 : 海洋波の方向スペクトル推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港湾技術研究所報告, 第32巻第1号, 1993, pp.3~25.
- 16) 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.
- 17) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎 : 情報量統計学, 共立出版, 1983, 236p.