

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

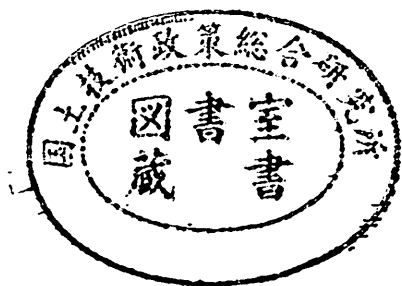
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 35      NO. 1      MAR. 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第35巻 第1号 (Vol.35, No.1), 1996年3月 (Mar.1996)

## 目次 (CONTENTS)

1. Wave Height and Fraction of Breaking Waves on a Bar-Trough Beach  
—Field measurements at HORS and Modeling—  
.....Yoshaki KURIYAMA and Yasushi OZAKI.....1  
(バー型海岸における波高と碎波率の岸沖分布  
—波崎海洋研究施設における現地観測とモデルの開発—  
.....栗山善昭・尾崎 靖)
2. 護岸越波量における波の多方向性の影響  
.....平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榎本達也.....39  
(Effect of Wave Directionality on Overtopping at Seawall  
.....Tetsuya HIRAISHI, Norio MOCHIZUKI, Kazuo SATO, Haruhiro MARUYAMA,  
Tsuyoshi KANAZAWA, and Tatsuya MASUMOTO)
3. 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第2報) —いわき沖における7か年方向スペクトル統計—  
.....清水勝義・永井紀彦・橋本典明.....65  
(On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas  
— 2nd Report:7-Year Statistics of Directional Wave Spectra of Iwaki —  
.....Katsuyoshi SHIMIZU, Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO)
4. 主成分分析とカルマンフィルタを用いた統計的波浪予測手法の適用性について  
.....橋本典明・永井紀彦・清水勝義・菅原一晃.....91  
(On the Reliability of the Statistical Wave Forecasting through Kalman Filtering  
Combined with Principal Component Analysis  
.....Noriaki HASHIMOTO, Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi SHIMIZU,  
and Kazuteru SUGAHARA)
5. 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率に関する研究  
.....土田 孝・湯 恰新.....117  
(The Optimum Safety Factor For Stability Analysis of Harbour Structures by Use of  
the Circular Arc Slip Method  
.....Takashi TSUCHIDA, Tang Yi Xin)
6. 市区町村間の道路距離と時間を用いた三大湾の港湾貨物背後流動特性の解析  
.....池田秀文・布川恵啓・村田利治・竹下正俊・奥田 薫・岡野秀男.....147  
(A Quantitative Analysis on Characteristics of the Land Transport Flow of Port Cargo  
through Three Major Bays  
.....Hidefumi IKEDA, Yoshihiro NUNOKAWA, Toshiharu MURATA, Masatoshi TAKESHITA,  
Kaoru OKUDA, and Hideo OKANO)
7. アジア圏域を軸とした21世紀の日本の海運像  
[CALSによるコンテナ流動ネットワークとアジアが結ぶ世界高速コンテナ航路の形成]  
.....高橋宏直.....189  
(The Vision of Japanese Marine Transportation in the 21 Century From a View Point of Asian Area  
.....Hironao TAKAHASHI)

### 3. 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第2報) —いわき沖における7か年方向スペクトル統計—

清水勝義\*・永井紀彦\*\*・橋本典明\*\*\*

#### 要 旨

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る。波浪に関する正確で総合的な情報をとらえることは、港湾の計画・設計・施工のいずれの分野においても重要で、今後、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出現特性を把握する必要性が増大していくものと思われる。

前報では、いわき沖で観測される方向スペクトルの特性を解明すべく、1989年および1990年の2年間の観測結果をもとに、方向スペクトルの通年の変動特性について、気象擾乱時における方向スペクトル形状と気象擾乱の種類・進路との関係について、波浪場の代表波向について、波高・波向に関する沿岸域の観測結果との関係について、それぞれ検討を行っている。

本研究では、前報で対象とした観測を含めた約7年間の観測結果をもとに、方向スペクトルの月別の出現特性を把握するとともに、2年間の観測では把握出来なかった年による変動を明らかにした。また、特定の気象擾乱時に関する検討であった代表波向についても、様々な気象擾乱時を含めたより系統的な解析を行った。さらに、主成分分析の方向スペクトル時系列データへの適用による、方向スペクトルの変動特性の把握の試み、プレトシュナイダー(Bretschneider)・光易型周波数スペクトルおよび光易型方向分布関数による方向スペクトル標準形の、方向スペクトル観測値への適合性も検討した。

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 周波数および波向に関して方向スペクトルを積分して得られる波向別および周期別のエネルギー分布の年別・月別平均値を求めて、経年変動や季節変動を明らかにした。エネルギー分布の月別平均値は、年毎にその月に生じた気象擾乱によって大きく変動することが示された。
- ② 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諸元がどの程度多様な方向スペクトル特性を代表しうるかに関して検討を行った。この結果、特に双峰型の方向スペクトル形状の場合は、方向スペクトルのピーク波向と平均波向の相関は極めて低くなることが示された。波向に関する代表諸元の選定にあたっては、その目的にあわせた適切な選定を行う必要がある。
- ③ 方向スペクトル標準形の、高波ピーク時の方向スペクトル実測値へのあてはめを行った結果、最小自乗法によって求めた適合 $S_{\text{max}}$ としては10程度のケースが多く、方向スペクトル標準形の採用は、波高ピーク時においては、妥当な場合が多いことが示された。ただし、スペクトル形状は、実測値と標準形は完全には一致せず、主観的形状評価から見ると形状が異なっていることが多い。
- ④ 主成分分析を方向スペクトル時系列データに適用した結果、上位数個の主成分で、方向スペクトルの変動の多くは再現可能であり、本手法は、波の発達から減衰の過程における方向スペクトルの時系列変化の概要を把握するためには有効な手法であることが示された。なお、各主成分の物理的意味を考察すると、第1主成分は波の平均エネルギーに、第2および第3主成分は方向スペクトルのピーク波向およびピーク値に、それぞれ関連する主成分であると考えられる。また、第4主成分は、S系の低周波側にエネルギーが集中するときに、その意味が明確となる主成分であると考えられる。

キーワード：方向スペクトル，現地観測，波浪統計，深海波，主成分分析，全国港湾海洋波浪観測網(NOWPHAS)

\*水工部 主任研究官

\*\*水工部 海象調査研究室長

\*\*\*水工部 海洋エネルギー利用研究室長

### 3. On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas (2nd Report : 7-Year Statistics of the Directional Wave Spectra off Iwaki)

Katsuyoshi SHIMIZU \* · Toshihiko NAGAI \*\* · Noriaki HASHIMOTO \*\*\*

#### Synopsis

Ports and harbours tend to be developed in a larger scale and in deeper seas. It is important to understand accurate and overall information on waves in each field of the plan, the design, and the construction of ports and harbors. Therefore, in addition to the parameters of the significant waves being used now, characteristics of the directional wave spectra will be necessary.

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=-154m), 42km off the Pacific coast of Japan, as one of the stations of NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS).

This report introduces the characteristics of the directional wave spectra off Iwaki based on the observation result for about seven years.

The major conclusions are shown as follows:

- (1) Annual and monthly directional and frequential wave energy distribution are shown. Monthly average value of the energy distribution fluctuates largely according to the characteristics of the weather disturbance.
- (2) When the wave comes from various directions, the correlation between the direction of the peak of the directional wave spectra and the average wave direction obtained by the covariance method is extremely low. It is necessary to select an appropriate definition of the representative wave direction according to the purpose.
- (3) Comparison of the observed spectra and theoretical directional spectra, which is shown by Bretschneider-Mitsuyasu's frequency spectrum and Mitsuyasu's angular spreading function shows good agreement at the peak of the wave height during extremely severe sea states.
- (4) The principal component analysis is applied to the observed directional wave spectra. The majority of the fluctuation of the spectra can be explained with the use of several principal components which has high-ranking contribution rate. The analysis is effective to understand the outline of the fluctuation of the time series of the directional wave spectra during extremely severe sea states.

**Key words** : Directional Wave Spectrum, Field Observation, Wave Statistics,  
Deepwater Waves, Principal Component Analysis,  
Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARborS (NOWPHAS)

---

\* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

\*\* Chief, Marine Observation Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\*\* Chief, Ocean Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engineering Division

# 目 次

要 旨	65
1. はじめに	69
2. いわき沖波浪観測システム	69
2.1 観測システムの概要	69
2.2 方向スペクトルの解析対象期間および解析方法	70
3. 方向スペクトルの出現特性	70
3.1 方向スペクトルの季節変動	70
3.2 波向の代表諸元に関する考察	72
4. 方向スペクトル標準形の実測値への適合性	77
4.1 方向スペクトル標準型について	77
4.2 検討の概要	78
4.3 方向スペクトル標準型のあてはめ例	78
4.4 方向スペクトル標準型のあてはめ S m a x と相対誤差	79
4.5 双峰型方向スペクトルの出現状況	81
5. 主成分分析による方向スペクトルの変動特性把握	81
5.1 主成分分析の概要	81
5.2 解析方法	82
5.3 各主成分の意味の検討	82
5.4 主成分スコアの時系列変動	88
6. まとめ	89
参考文献	89

## 1. はじめに

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る。波浪に関する正確で総合的な情報をとらえることは、港湾の計画・設計・施工のいずれの分野においても重要で、今後、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出現特性を把握する必要性が増大していくものと思われる。特に、外洋に面した港湾では、防波堤等の外郭施設の位置・形状を計画する上で、来襲する波浪のエネルギーの方向分布特性が必要不可欠な情報である。

前報<sup>1)</sup>では、いわき沖で観測される方向スペクトルの特性を解明すべく、1989年および1990年の2年間の観測結果をもとに、①方向スペクトルの通年的な変動特性について、②特定の気象擾乱時における方向スペクトル形状と気象擾乱の種類・進路との関係について、③波浪場の代表波向について、④波高・波向に関する沿岸域の観測結果との関係について、それぞれ検討を行っている。

本研究では、前報で対象とした観測を含めた約7年間の観測結果をもとに、方向スペクトルの月別の出現特性を把握するとともに、2年間の観測では①で把握出来なかった、年による変動を明らかにすることとする。また、特定の気象擾乱時の結果に関する検討であった③については、様々な気象擾乱時を含めたより系統的な解析を行う。

また、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、それらは気象条件の変化により時々刻々と変化する。周波数スペクトルの時系列変化に関する研究例はこれまでも多くみられるもの<sup>2)</sup>、方向スペクトル形状の時系列変動特性を系統的に検討することは困難で、研究事例も少ない。そこで、方向スペクトルの時系列データを主成分分析して得られた結果を用いた、系統的な変動特性の把握も試みる。

さらに、現在、港湾構造物の設計で、比較的取り扱いの簡単なブレットシュナイダー(Bretschneider)・光易型の周波数スペクトル<sup>3)</sup>および光易型方向分布関数<sup>4)</sup>による方向スペクトルが標準形として一般に用いられている<sup>5)</sup>。沖合で現実に観測される方向スペクトルの形状は多様であり、それらを網羅的に表現する方向スペクトルの標準形を求めることは困難であり、これまで適用されてきた上記の標準形にしても、どの程度の適合性を持つかを再確認することは重要なことである。また、今後、新たな方向スペクトルの標準形を提案するにしても、現在用いられている標準形の限界を知ることが、その最初のステッ

プとなるであろう。そこで、いわき沖で観測された方向スペクトルの、方向スペクトル標準形へのあてはめを試み、方向スペクトル標準形の、実際に観測される方向スペクトルへの適合性についての検討もあわせて行った。

なお、前報で検討した②及び④については、別途進めている研究の中で、引き続いて検討を行うこととしている。

## 2. いわき沖波浪観測システム

### 2.1 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154m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(磐城沖石油開発(株)所有)の脚を利用して計測器を設置し、従来では困難とされてきた沖波の直接水位変動計測による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。観測局の外観、観測機器の仕様および取り付け位置については前報<sup>1)</sup>を参照されたい。なお、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。

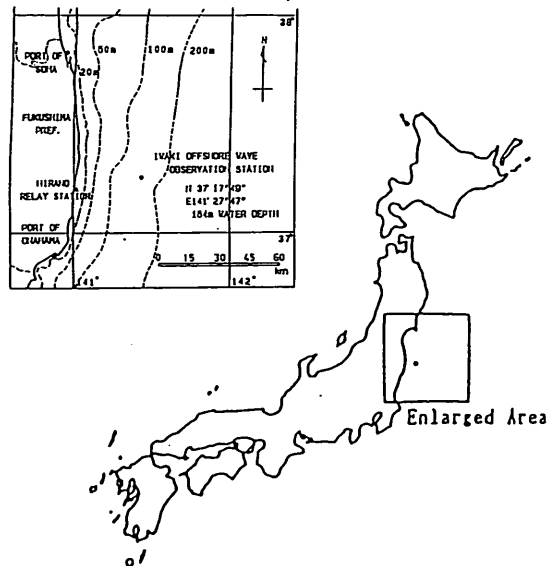


図-1 いわき沖の位置図

## 2.2 方向スペクトルの解析対象期間および解析方法

本研究で対象とした方向スペクトルの解析対象期間は1986年10月1日の観測開始から1993年12月31日までの約7年間とした。この期間の方向スペクトルの観測状況を図-2に示す。横軸は日付を、縦軸は各日の0:00から22:00の2時間毎の観測を表し、方向スペクトルの正常な観測結果が得られた観測は黒く塗りつぶしてある(26,345観測)。空白の部分は、欠測あるいは方向スペクトルの推定結果がその前後の推定結果からみて明らかに異常なものであると考えられるものを示している。

方向スペクトルの推定には拡張最大エントロピー原理法(EMEP)<sup>6)</sup>を用いた。この際、波向の分割数は32、周波数分割数および分割幅は48および0.0078Hzとして計算を行った。また、ゼロアップ・クロス法による有義波解析および共分散法<sup>7)</sup>による平均波向解析もあわせて実施した。

また、4.と5.では、高波期間内に測得された方向スペクトルについて議論した。高波期間とは次のように定義される。すなわち、有義波高が上限値(本研究では3.5m)を越えたものを高波とし、その期間は下限値(同1.5m)を越えてからこれを下回るまでとする。

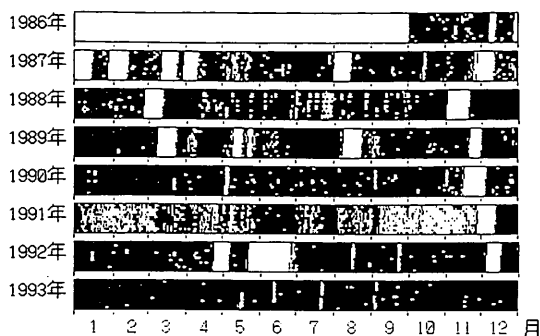


図-2 方向スペクトルの観測状況

## 3. 方向スペクトルの出現特性

### 3.1 方向スペクトルの季節変動

#### (1) 波向別および周期別のエネルギー分布でみた月別出現特性

表-1および図-3は、いわき沖における有義波高および有義波周期の年別・月別平均値を年間変動図に示したものである。各年の有義波諸元の年平均値は、波高は1.60mから1.77mの間に、周期は7.1秒から7.7秒の間に分布しており、比較的一定の値に近づいているものの、

表-1 有義波諸元の年別・月別平均値

	年平均	月 平 均											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
全観測	1.69 7.5	1.61 7.1	1.83 7.5	1.90 8.0	1.79 7.6	1.55 7.3	1.48 7.3	1.38 7.1	1.64 7.8	1.96 8.1	1.80 7.7	1.70 7.5	1.62 7.3
1986年	1.60 7.1										1.90 8.0	1.31 6.4	1.59 6.9
1987年	1.61 7.5	1.69 7.2	1.75 7.2	1.76 7.3	1.46 7.3	1.47 6.9	1.60 7.7	1.36 7.9	1.30 7.8	2.37 8.7	1.60 8.0	1.60 7.2	1.35 6.5
1988年	1.69 7.2	1.38 6.2	1.38 6.4	1.96 8.0	2.05 7.7	1.68 7.4	1.48 7.6	1.59 7.2	1.53 7.5	2.45 8.0	1.51 6.7	1.90 7.6	1.35 6.8
1989年	1.77 7.6	1.92 7.7	1.80 7.4	2.26 8.6	2.03 8.0	1.65 7.9	1.60 7.3	1.45 7.0	1.80 7.9	1.53 7.3	1.82 7.3	1.74 7.6	1.69 7.1
1990年	1.72 7.6	1.50 7.0	2.05 8.0	1.71 7.6	1.88 7.6	1.42 7.3	1.43 6.9	1.33 6.8	1.77 8.0	1.74 7.3	1.98 8.1	1.98 8.4	1.90 8.0
1991年	1.69 7.7	1.74 7.8	2.28 8.8	1.58 7.2	1.55 6.9	1.47 7.0	1.35 7.3	1.31 7.1	1.80 8.1	2.00 8.5	2.07 7.9	1.52 7.3	1.66 8.1
1992年	1.67 7.7	1.17 6.5	1.76 7.2	2.04 8.6	2.05 8.0	1.61 7.7	1.39 7.2	1.07 7.0	1.50 7.6	2.14 9.3	2.02 8.5	1.79 8.1	1.54 6.9
1993年	1.68 7.5	1.88 7.7	1.82 7.4	2.01 8.4	1.51 7.4	1.55 7.0	1.54 7.1	1.58 6.9	1.74 7.9	1.48 7.9	1.51 7.1	1.73 7.3	1.83 7.8

上段：有義波高 (m)、下段：有義波周期 (sec)

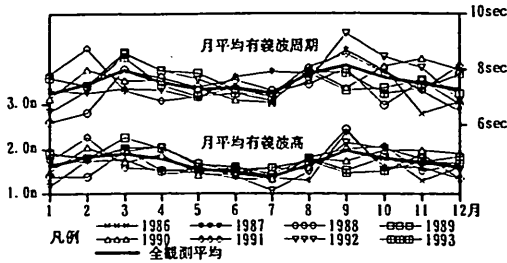


図-3 有義波諸元の年間変動

月平均値では年によりかなりの変動がみられることがわかる。例えば、2月の平均有義波波高は、1988年には1.38mであったのに対して1991年には2.28mとなっており、2倍近い相違が見られる。

方向スペクトルも、このような有義波諸元の変動に対応して以下にみるように、月別平均値は年によりかなりの変動がみられる。

方向スペクトルを周波数および波向に関して積分して得られる波向別および周期別のエネルギー分布の年別・月別平均値を、それぞれ図-4および図-5に示す。

図-4の方向別エネルギー分布の月別の平均値をみると、12月～2月にかけてはE～N系の波浪系が、8月にはS～E系の波浪系がそれぞれ支配的であり、5月～7月にかけては、比較的波浪エネルギーの絶対値が低く、静穏になっている状況が理解される。4月および9月は、E～N系とS～E系の波浪系が共存し双峰型の方向スペクトル形状が見られる。ただし、月平均方向別エネルギー分布は、そのエネルギーの絶対値および分布形状とも

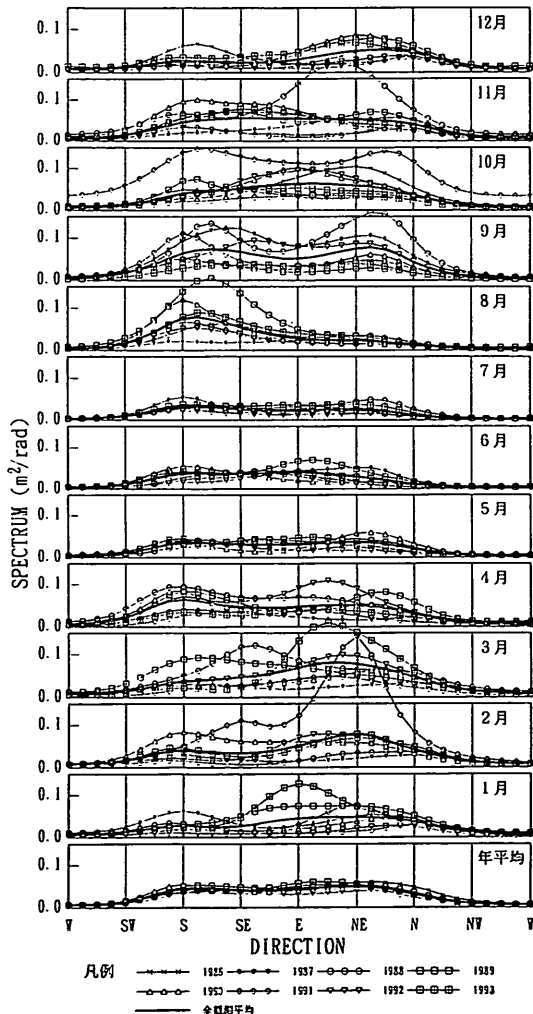


図-4 波エネルギーの方向別分布の年間変動

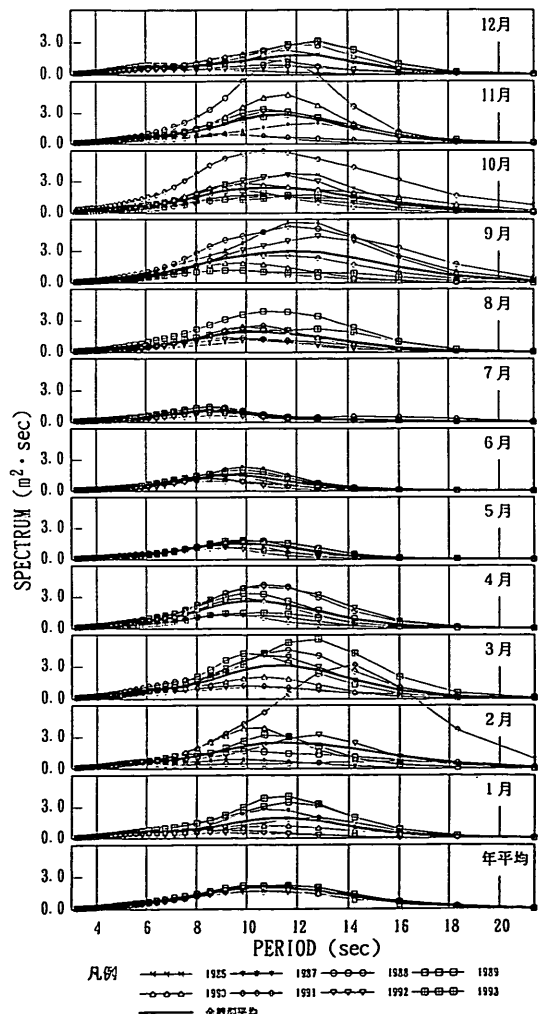


図-5 波エネルギーの周波数別分布の年間変動



年によって非常に大きな変動を示していることには、注意を要する。

一方、図-5の周波数別エネルギー分布の月別の平均値をみると、エネルギーの絶対値は年によって大きく変動するものの、ピークとなる周期の季節変動はほぼ一定であり、5月から7月にかけては10s以下の短周期側、秋期から冬季を経て春期にかけては10s以上の長周期側にピーク周期が変動している。

エネルギーの年平均値を見れば、波向別および周期別のいずれの分布を見ても、月平均値ほどには年毎の変動は大きくはなく、年間を通じての波浪のエネルギーは、波向別にはSからEを経てNまでほぼ180°にわたってなだらかなピークを示し、周波数別にも8sから14sにかけてやはりなだらかなピークを示し、極めて広い範囲に分布していることがわかる。

表-2は、いわき沖での波浪観測を開始以来、最大有義波高3.5m以上を記録した主要な高波期間を整理したものである<sup>8)</sup>。方向スペクトルの変動は、これら主要な気象擾乱の発生に強く依存している。例えば、1991年2月には、台風並に発達した低気圧のゆっくりとした通過により、周期10~14秒、波高4m以上が約4日間も続くという2月としては他の年にはみられない大きな気象擾乱が発生した。このためこの年の2月は特に周波数別エネルギー分布が他の年に比較して周期の長いところにピークを持つ極めて異なった形状となっている。また、3月についてみると、1988年は波向別分布のピークが平均値NEから大きくずれている。これは、1988年3月22日に最大有義波高8.43mを記録したSE方向が卓越した擾乱を反映したためである。1989年3月もピークが月平均値からずれているが、これは同月1日前後に発生したSSE系の擾乱の影響を強く受けたためである。

このように、一つの擾乱でその月の平均的な方向スペクトルの特性が大きく変動する。方向スペクトルの季節変動の特性を議論するためには、さらに長期間の観測が必要であると考えられる。

## (2) 方向スペクトルの月別出現特性

(1)では、方向スペクトルの季節変動を波向別あるいは周期別のエネルギー分布をもとに概観したが、方向スペクトルの月平均値の年平均値(全観測平均)からの偏差といった観点から整理すると月別の出現特性がより明確となる。図-6に年平均値を、図-7に月別平均値を、図-8に方向スペクトルの月別平均値の年平均値からの偏差をそれぞれ示す。図中の実線は(月平均値-年平均値)の値が正値すなわち年平均値よりも当該月平均値の方が

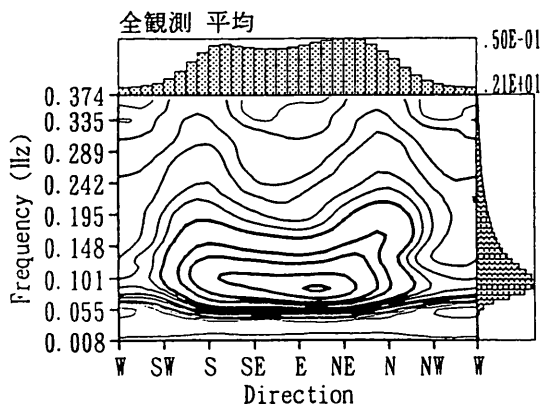


図-6 方向スペクトルの年平均値

大きい条件を、点線は負値すなわち年平均値よりも当該月平均値の方が小さい条件を表している。

図-8をもとに各月の特徴を以下のように概観する。すなわち、冬季の12月~2月および3月には、E~N方向の低周波側およびN方向の高周波側で、4月は低周波側は全方向で高周波側はSW~SEの限られた方向で、それぞれ年平均値よりも高いエネルギー分布を示す特徴的なパターンが見られる。また、5月から8月にかけては、他の月に比較して波のエネルギーの卓越方向がSW~Eに限定されているのが特徴的である。特に、7月は、E方向の0.18Hz(5~6s)の比較的高周波数周辺以外は、すべての方向および周波数帯で、年平均値よりもエネルギーが低くなっていることが注目される。9月および10月はS~N方向の広い周波数帯で年平均値よりも高いエネルギー分布を示すが、特にS~SE方向に台風からのうねりと考えられる周期15秒(0.06Hz)付近の波浪の卓越が見られる。11月はN方向の高周波側のエネルギーが特に顕著である。

## 3.2 波向の代表諸元に関する考察

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諸元がどの程度多様な方向スペクトル特性を代表しうるかはあまり明確でない。このことについて、前報では2方向波浪が出現した代表的なケースについて第1ピーク波向、第2ピーク波向および平均波向の経時変化をもとに考察を行っているが、系統的な検討は不十分であった。そこで、共分散法<sup>7)</sup>による波向解析を実施している1988年以降のデータを対象に、全観測結果を、明らかにピークが1つしか存在しない場合(ケース①)と、第1ピークと第2ピークが明確には区分出来ないような場合も含め2つ以上のピークがみられる場合

表一2 最大有義波高3.5m以上を記録した主な高波期間

年	高波期間	最大有義高 観測日時	最大有義高 波高及び周期 H <sub>1/2</sub> (m) T <sub>1/3</sub> (s)	気象擾乱
89	1/ 8 22時~1/14 18時	1/11 18時	3.62 (11.6)	南岸シ及び冬型
	1/19 22時~1/29 20時	1/24 16時	5.65 (10.7)	南岸シ及び冬型
	2/25 20時~3/ 2 16時	2/26 8時	4.34 ( 8.0)	南岸シ及び冬型
	3/ 2 20時~3/ 9 12時	3/ 4 18時	4.03 ( 9.5)	日本海シ及び冬型
	4/ 8 8時~4/14 2時	4/ 9 6時	3.71 ( 7.4)	日本海シ及び冬型
	4/15 12時~4/18 0時	4/16 18時	4.15 ( 8.4)	二つ玉シ及び冬型
	4/22 6時~5/ 6 2時	4/24 10時	4.74 ( 9.7)	南岸シ及び冬型
	5/ 7 10時~5/ 9 10時	5/ 8 4時	3.67 (10.1)	南岸シ及び日本海シ
	6/17 0時~6/21 8時	6/17 22時	4.51 ( 9.8)	南岸シ及び二つ玉シ
	7/27 0時~8/ 8 10時	8/ 6 18時	8.56 (10.5)	T13号
	8/27 6時~8/29 10時	8/28 0時	4.48 ( 8.8)	T17号及び崩れのシ
	10/ 2 2時~10/ 9 4時	10/ 3 12時	3.52 ( 9.0)	冬型
10/11 20時~10/15 2時	10/ 8 12時	3.90 (12.3)	T25号及び冬型	
10/31 16時~11/ 4 6時	11/ 3 4時	4.09 ( 9.4)	南岸シ及び日本海シ	
12/14 12時~12/21 8時	12/15 20時	4.48 (11.7)	日本海シ及び冬型	
			5.80 (11.7)	冬型

気象擾乱の略記 T: 台風、L: 低気圧、冬型: 冬型気圧配置

最大有義波高観測日時に\*印をつけたものは、その時刻の方向スペクトルの観測結果が得られていることであつたが、前後数時間以内には方向スペクトルの観測結果が得られていないことを示す

年	高波期間	最大有義高 観測日時	最大有義高 波高及び周期 H <sub>1/2</sub> (m) T <sub>1/3</sub> (s)	気象擾乱
86	10/ 8 0時~10/14 16時	10/ 9 2時	7.24 (12.0)	T18号及び二つ玉シ
	10/21 10時~10/23 0時	10/12 2時	5.79 ( 9.6)	冬型
	12/14 16時~12/17 0時	10/22 9時	3.56 ( 7.9)	日本海シ
	12/18 22時~12/21 0時	12/15 12時	4.12 ( 7.9)	南岸シ
	1/12 20時~1/15 10時	12/19 14時	6.02 (10.8)	二つ玉シ及び冬型
	1/23 6時~1/26 6時	1/14 0時	3.96 (10.2)	二つ玉シ冬型
	3/18 0時~3/26 6時	1/24 2時	3.94 ( 8.5)	日本海シ及び冬型
	4/21 10時~4/25 6時	3/25 20時	3.52 ( 7.5)	二つ玉シ及び冬型
	6/20 14時~6/23 6時	4/22 4時	3.59 ( 7.6)	日本海シ及び南岸シ
	9/11 8時~9/23 10時	6/21 10時	5.35 ( 9.8)	前線性シ
	10/15 8時~10/19 0時	9/13 4時	4.53 (14.2)	前線性シ
	11/ 9 12時~11/18 2時	9/17 12時	6.67 (11.4)	前線性シ及びT13号
88	3/22 4時~3/25 6時	10/17 18時	3.98 ( 9.1)	T19号及び崩れのシ
	3/29 20時~4/10 14時	11/10 18時	3.75 (13.0)	日本海シ
	4/12 10時~4/15 6時	3/22 22時	8.43 (11.6)	南岸シ
	4/18 12時~4/22 18時	3/31 2時	3.90 (10.2)	前線性シ
	5/ 7 20時~5/ 9 20時	4/ 8 18時	5.16 ( 9.5)	南岸シ
	5/22 22時~5/26 16時	4/13 16時	4.02 ( 8.7)	日本海シ及び南岸シ
	5/29 22時~6/ 3 14時	4/19 12時	6.48 ( 9.6)	南岸シ
	7/21 20時~8/ 4 22時	5/ 8 6時	3.78 ( 7.6)	南岸シ
	9/ 3 16時~9/20 14時	5/23 16時*	4.76 (10.0)	前線性シ
	10/ 6 0時~10/ 8 4時	6/ 3 14時	4.22 ( 9.0)	前線性シ及び二つ玉シ
	11/18 22時~12/ 1 22時	7/31 18時	3.76 (15.5)	T7号
				7.73 (12.2)
			4.06 (10.1)	前線性シ
			4.80 (12.5)	冬型
			4.43 ( 9.0)	南岸シ
			4.03 (10.4)	日本海シ及び二つ玉シ
			4.68 (10.4)	南岸シ及び冬型

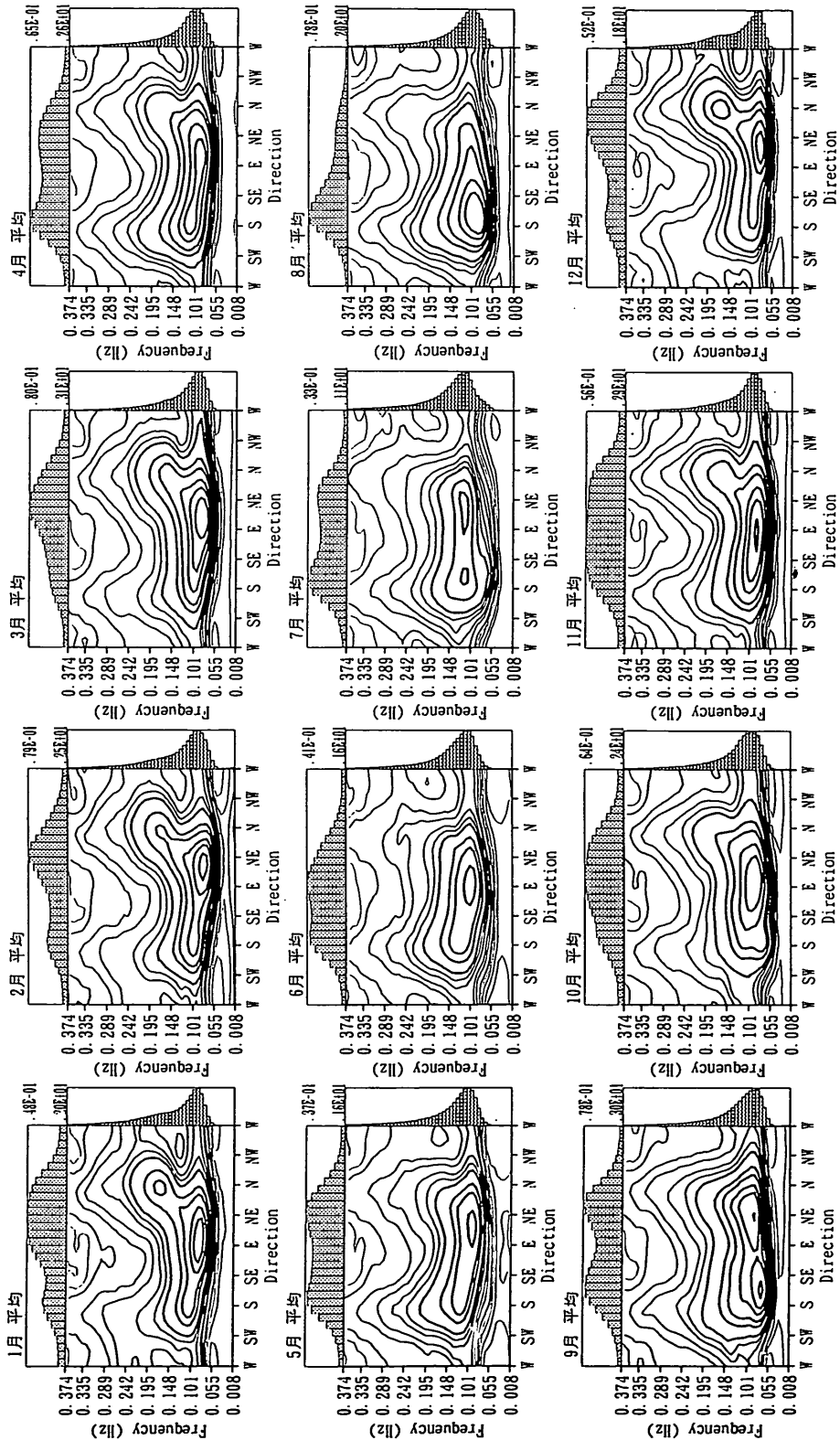
表一2 最大有義波高3.5m以上を記録した主な高波期間 (続き)

年	高波期間	最大有義高 観測日時	最大有義高 波高及び周期 H <sub>1/2</sub> (m) T <sub>1/2</sub> (s)	気象擾乱	
90	1/10 16時～1/13 22時	1/11 0時	3.94 (9.6)	二つ玉L	
	2/10 20時～2/13 6時	2/11 20時	5.20 (10.1)	日本海L	
	2/15 8時～2/18 10時	2/16 20時	3.59 (8.1)	南岸L	
	2/18 22時～2/22 10時	2/20 18時	6.53 (10.0)	日本海L	
	3/10 14時～3/17 0時	3/12 12時	4.07 (8.2)	日本海L	
	4/ 8 0時～4/10 2時	4/ 8 18時	4.57 (10.7)	日本海L	
	4/13 12時～4/19 4時	4/15 18時	3.86 (8.9)	二つ玉L	
	4/21 16時～4/25 10時	4/23 10時	3.75 (9.0)	日本海L	
	4/30 12時～5/ 6 8時	5/ 1 16時	5.92 (10.7)	日本海L	
	6/ 9 8時～6/12 0時	6/10 2時	4.06 (7.7)	日本海L	
	8/ 9 8時～8/11 18時	8/10 20時	6.29 (8.9)	T11号	
	9/17 10時～9/23 2時	9/20 10時	5.45 (9.5)	T19号	
	9/30 8時～10/ 3 6時	10/ 1 6時	4.00 (8.1)	T20号	
	10/ 8 8時～10/10 18時	10/ 8 20時	3.57 (6.7)	T21号及び崩れのL	
	10/21 16時～10/28 18時	10/23 14時	5.63 (13.2)	T23号	
			10/26 12時	5.12 (8.4)	二つ玉L
			11/ 4 8時～11/ 7 0時	6.76 (9.7)	南岸L
			11/ 9 20時～11/11 14時	7.30 (10.6)	日本海L
			12/11 18時～12/16 0時	5.43 (8.5)	日本海L
	91	12/19 2時～12/24 10時	12/22 18時	3.53 (12.4)	二つ玉L
1/19 0時～1/21 0時		1/19 12時*	3.79 (12.3)	東方海上しかめ動	
2/15 6時～2/21 10時		2/16 4時	8.06 (11.5)	二つ玉L	
3/23 6時～3/25 10時		3/23 14時	3.62 (8.7)	南岸L	
4/17 12時～4/19 10時		4/18 14時	4.59 (8.5)	日本海L	
9/18 22時～9/24 10時		9/20 6時	4.79 (12.1)	T18号	
9/27 22時～9/29 6時		9/28 6時	4.70 (8.2)	T19号	
10/ 1 14時～10/ 3 12時		10/ 2 0時	3.81 (8.7)	南岸L	
10/ 6 18時～10/15 14時		10/12 12時*	5.61 (10.6)	T21号及びT22号	
11/ 8 6時～11/11 22時		11/ 9 4時*	3.75 (10.5)	二つ玉L	
11/29 2時～12/ 6 14時		11/29 6時	3.98 (8.4)	T28号	

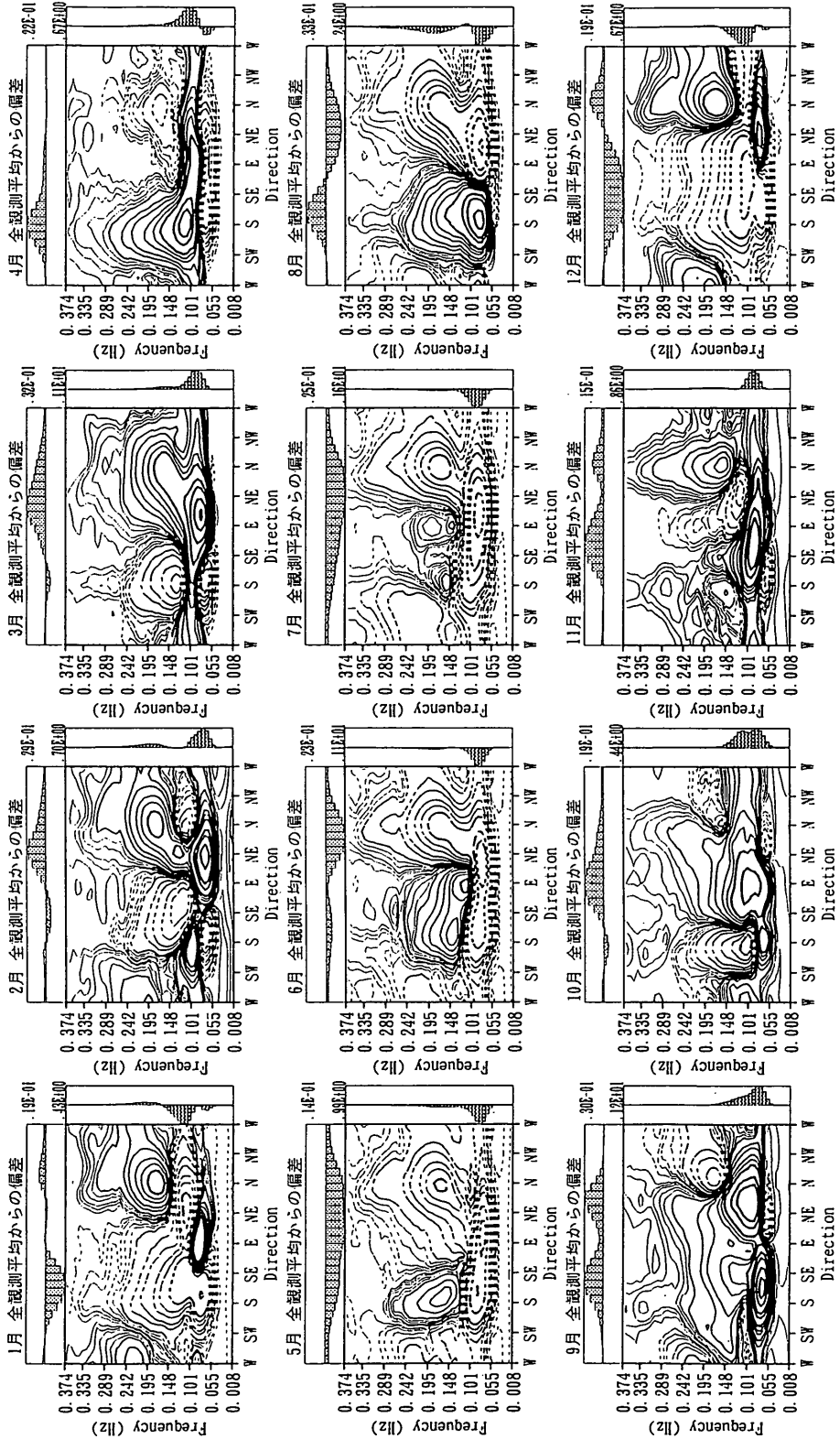
気象擾乱の略記 T : 台風、L : 低気圧、冬型 : 冬型気圧配置

最大有義波高観測日時に\*印をつけたものは、その時刻の方向スペクトルは欠測であったが、前後数時間以内には方向スペクトルの観測結果が得られていることを示す

年	高波期間	最大有義高 観測日時	最大有義高 波高及び周期 H <sub>1/2</sub> (m) T <sub>1/2</sub> (s)	気象擾乱	
92	1/31 20時～2/ 5 6時	2/ 2 0時	5.40 (11.6)	南岸L及び冬型	
	2/24 22時～3/ 3 2時	2/26 4時	5.37 (13.7)	東方海上しかめ動	
	3/ 5 18時～3/12 22時	3/ 6 4時	5.41 (10.7)	南岸L及び冬型	
	3/18 10時～3/22 18時	3/19 0時	4.79 (9.3)	南岸L	
		3/21 14時	3.83 (7.6)	南岸L及び冬型	
		3/24 2時～3/27 12時	3/24 20時	4.47 (9.8)	南岸L
		3/29 18時～4/ 9 18時	3/30 12時	3.65 (8.4)	南岸L
		4/10 22時～4/18 8時	4/13 16時	3.56 (9.0)	南岸L
			4/16 14時	3.54 (8.3)	日本海L
		4/22 6時～4/23 14時	4/22 22時	3.60 (9.7)	二つ玉L
		7/ 1 2時～7/ 2 18時	7/ 1 14時	3.78 (9.5)	T3号及び崩れのL
		8/ 8 6時～8/10 10時	8/ 9 12時	3.75 (7.1)	T10号及び崩れのL
		9/ 5 16時～9/12 16時	9/11 8時	5.40 (11.5)	T17号
		9/13 2時～9/20 12時	9/14 20時	4.19 (12.1)	T18号かめ動うねり
		9/29 8時～10/ 2 0時	9/30 12時	3.61 (8.8)	日本海L
		10/ 4 2時～10/11 2時	10/ 9 14時	4.27 (8.6)	南岸L
		10/19 18時～10/26 14時	10/21 20時	5.32 (10.7)	南岸L
		11/ 6 2時～11/11 16時	11/ 8 14時	5.83 (10.8)	T28号崩れのL及び北偏H
	93	11/19 22時～11/26 8時	11/20 20時	4.73 (9.3)	南岸L
1/15 0時～1/19 18時		1/16 18時	5.64 (10.4)	二つ玉L及び冬型	
1/24 16時～1/30 2時		1/26 4時	5.63 (9.9)	南岸L及び高気圧かめ動	
2/17 6時～2/20 20時		2/17 22時	4.09 (8.9)	二つ玉L	
2/21 16時～2/28 6時		2/22 20時	4.20 (9.3)	L本州横断及び冬型	
3/ 7 14時～3/15 10時		3/ 9 4時	6.65 (13.1)	東方海上しかめ動	
		3/13 8時	4.44 (8.1)	東方海上しかめ動	
		3/28 16時～3/31 18時	3/29 14時	6.04 (9.9)	東方海上しかめ動
		5/ 2 16時～5/ 6 12時	5/ 3 4時	3.84 (7.9)	南岸L
		6/ 3 0時～6/ 8 2時	6/ 3 14時	3.73 (7.3)	日本海L
		8/25 16時～8/28 20時	8/27 20時	7.89 (11.3)	T11号
		10/ 7 14時～10/11 22時	10/ 8 12時	4.94 (11.0)	T19号からのうねり
		10/30 0時～11/ 1 2時	10/31 0時	3.59 (7.9)	冬型
	11/12 8時～11/23 2時	11/14 8時	6.85 (9.8)	二つ玉L	
		11/21 14時	3.71 (7.1)	冬型	
	12/10 18時～12/15 4時	12/13 2時	3.90 (12.1)	東方海上しかめ動	
	12/20 20時～12/24 0時	12/21 20時	4.03 (10.9)	冬型	



図一七 方向スペクトルの月別平均値



図一8 方向スペクトル月別平均値の年平均値からの偏差

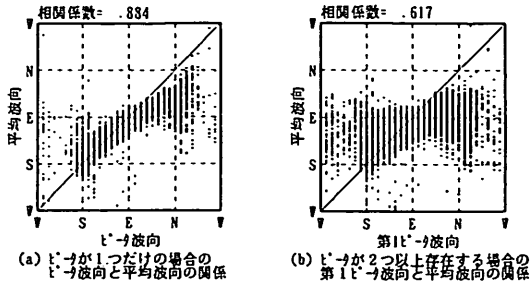


図-9 平均波向とピーク波向の関係

(ケース②) に分類し、平均波向と方向スペクトルのピーク波向との関係の把握を試みた。

図-9 (a)にケース①におけるピーク波向と平均波向の相関を、図-9 (b)にケース②における第1ピーク波向と平均波向の相関をそれぞれ示す。

ピークが1つしか存在しない場合には、平均波向とピーク波向の間には一応の相関がみられるが、ピークが2つ以上存在する場合には、第1ピーク波向と平均波向の間の相関は極めて低い。

すなわち、平均波向とスペクトルのピーク波向の相関はあまり高くなく、特に複数のスペクトルピークを有する波浪場においては、平均波向とスペクトルの第1ピーク波向との相関は極めて低いことが、改めて確認された。波浪場を表現する代表波向を論じる際には、このようにその定義によって波向そのものが大きく異なることを認識した上で、その目的にあわせた適切な代表波向を選定しなければならない。

#### 4. 方向スペクトル標準形の実測値への適合性

現在、港湾の施設の設計では<sup>3)</sup>、プレットシュナイダー(Bretschneider)・光易型の周波数スペクトル<sup>3)</sup>および光易型方向分布関数<sup>4)</sup>を組み合わせた方向スペクトルが、標準形として一般に用いられている(以下、方向スペクトル標準型と呼ぶ)。しかし、このことの妥当性と適用限界に関して、長期間における実測値との比較検討を行った研究例はない。そこで、いわき沖で観測された方向スペクトルへ、方向スペクトル標準形のあてはめを試み、方向スペクトル標準形の適合性についての検討を行った。

##### 4.1 方向スペクトル標準型について

方向スペクトル  $S(f, \theta)$  は、周波数スペクトル  $S(f)$  と、方向別のエネルギー分布状態を表す方向分布関数

$G(f; \theta)$  を用いて、一般に次式のように書き表される。

$$S(f, \theta) = S(f) \cdot G(f; \theta) \quad (1)$$

風波の周波数スペクトルの標準型に関しては、現地観測の結果に基づき、あるいは理論的な考察により、さまざまな形が提案されている。現在のところ、いずれが最も適切なものであるかよくわかっていないのが現状であるが、我が国では比較的取り扱いの簡単な、次式のプレットシュナイダー(Bretschneider)・光易型の周波数スペクトル<sup>3)</sup>が、有限な吹送距離における風波の周波数スペクトルの標準型として一般に用いられている。

$$S(f) = 0.257 \cdot H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3}^{-4} \cdot f^5 \cdot \exp\left(-1.03 \cdot T_{1/3}^4 \cdot f^4\right) \quad (2)$$

また、方向分布関数についても、波向観測が困難なこともあり、不十分な情報しか得られていない。このため、周波数スペクトルのような標準型を定めることは難しい。しかしながら、光易<sup>4)</sup>は、クローバーリーフ型ブイ式波高計を用いた綿密な観測結果に基づいて、方向分布関数の標準型として次式を提案している。

$$G(f; \theta) = G_0 \cdot \cos^{25}(\theta/2) \quad (3)$$

ここに、

$$G_0 = \left[ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{25}(\theta/2) d\theta \right]^{-1} \quad (4)$$

なお、光易らの原式では、風波を対象として  $S$  を風速に関係づけているが、合田と鈴木<sup>9)</sup> は  $S$  の最大値  $S_{\max}$  を主パラメータとして次式のような、工学的に使いやすい形に書き換えている。

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{ここに、 } f_p = 1 / (1.05 T_{1/3}) \quad (6)$$

また、沖波について、波浪条件と  $S_{\max}$  の関係として次のような値を提案している。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{I) 風波} & : S_{\max} = 10 \\ \text{II) 減衰距離の短いうねり} & : S_{\max} = 25 \\ & \text{(波形勾配が比較的大)} \\ \text{III) 減衰距離の長いうねり} & : S_{\max} = 75 \\ & \text{(波形勾配が小)} \end{array} \right\} \quad (7)$$

### 4.2 検討の概要

原則として、表-2に示した高波期間中の最大有義波記録時の方向スペクトルを対象として検討を行った。ただし、最大有義波記録時に方向スペクトルが欠測であった場合には(表-2に\*印を付けた6ケース)、前後数時間内の近傍の観測結果を対象としている。検討の対象は110ケースである。

(1)に示した周波数スペクトルおよび方向分布関数の、関数形および式中のパラメータについても、その適合性について検討してみることも興味のあるところである。このことについては次報以降で詳細に議論することとして、本研究では式(1)~式(6)により表現される方向スペクトル標準型を観測値にあてはめた結果により、その適合性の適合性を検討した。

方向スペクトル標準型にあてはめは、唯一その値を変えることが可能なSの最大値 $S_{max}$ を調整し、次式で定義される誤差V(残差二乗総和)を最小とすることで行った。

$$V = \sum_{j=1, j_{max}}^{i=1, i_{max}} \left[ \left( S_o(f_i, \theta_j) - S(f_i, \theta_j) \right)^2 df d\theta \right] \quad (8)$$

ここに、

$i_{max}$ : 方向スペクトル観測値の周波数分割数

$j_{max}$ : 方向スペクトル観測値の波向分割数

$df$ : 方向スペクトル観測値の周波数分割幅 (1/sec)

$d\theta$ : 方向スペクトル観測値の波向分割幅 (rad)

$S_o(f_i, \theta_j)$

: 周波数  $f_i$ , 波向  $\theta_j$  における方向スペクトル観測値の密度 ( $m^2 \cdot sec/rad$ )

$S(f_i, \theta_j)$

: 周波数  $f_i$ , 波向  $\theta_j$  における方向スペクトル標準型の密度 ( $m^2 \cdot sec/rad$ )

ただし、相対誤差を最小とする方向スペクトル標準型はあくまでも計算上便宜的なものであり、必ずしも方向スペクトル観測値との十分な適合性は保証されたものではない。そこで、適合性の判断にあたっては、方向スペクトル形状を見比べる、主観的な判断もあわせて行った。

### 4.3 方向スペクトル標準型にあてはめ例

図-10-1は、方向スペクトル標準型にあてはめ例として、1989年8月6日18時における方向スペクトル観測値と、式(8)で定義した誤差Vが最小となる $S_{max}$ にあてはめを行った方向スペクトル標準型を比較したものであり、比較的再現性のよい場合の例を示したものである。

左側の図が方向スペクトル観測値、左側の図があてはめ方向スペクトルを示しており、左側の図の上部には誤差Vが最小となる $S_{max}$ の値を表示している。また、両図の上には、観測日時、有義波高、有義波周期を表示しており、また、図の右側には、有義波高 $T_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ から求まる波長 $L_{1/3}$ の比である波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ 、誤差V、Vの平方根を左の図に示した方向スペクトル観測値の積分値 $m_0$ で除して無次元化した相対誤差、およびスペクトル密度のピーク値を両図で比較した比を示している。さらに、両図には、それぞれの図のスペクトル密度のピーク値を示している。

左右の両図は、ピーク的位置、高さおよび等高線の形状において大きな相違はなく、光易型方向関数が比較的よくあてはめられている。このときの $S_{max}$ の値は8であり、通常の風波においては $S_{max}$ の値を10程度とみなす現行の技術上の基準ともよい一致を示している。

一方、図-10-2は、1992年9月11日8時におけるあてはめ例を示したものであるが、この時の高波は2つの台風T9217およびT9218の通過に伴うものであり、顕著な

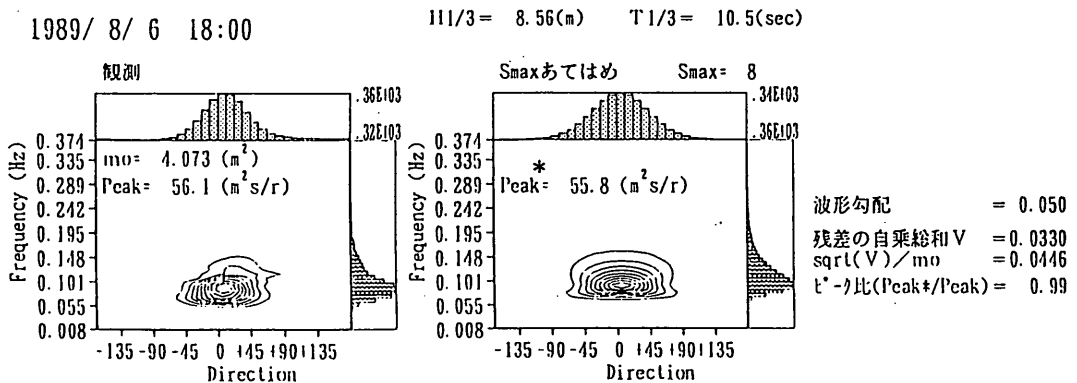


図-10-1 方向スペクトル標準型にあてはめ例 1

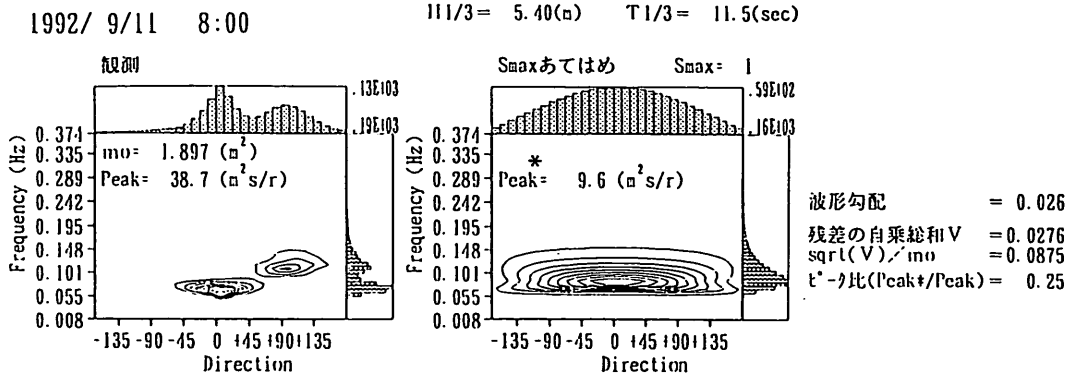


図-10-2 方向スペクトル標準型のあてはめ例2

双峰形状の方向スペクトルが見られた例である。あてはめられた方向スペクトルは、ピークの周波数は第2ピークの影響を受け高周波数側にずれており、またやはり第2ピークの影響で、あてはめ  $S_{max}$  の値が1となり極めて方向集中度の低いものとなっている。方向スペクトル形状から判断して、図-10-2はあてはめの再現性が比較的悪いケースであると言える。

なお、両図とも波向は、第1ピークの波向からの相対的な角度で示してある。

#### 4.4 方向スペクトル標準型のあてはめ $S_{max}$ と相対誤差

表-3は、4.2で述べた検討対象の方向スペクトル観測に、方向スペクトル標準型をあてはめた結果をとりまとめたものである。

表中には、あてはめ  $S_{max}$  と、式(8)の誤差  $V$  を方向スペクトル観測値の積分値  $m_0$  で除して無次元化した相対誤差を示す他、方向スペクトル観測値とあてはめ方向スペクトルの形状の一致の程度を主観的に評価した記号を、あわせて表示している。

○は、両者が比較的良好に一致していると判断された場合、×は比較的良好一致が悪いと判断された場合、P2は一致が悪いケースの中で、特に、実測方向スペクトルの形状が双峰型であった場合をそれぞれ意味している。

図-11-1は、表-3における、あてはめ  $S_{max}$  と相対誤差の関係を図化したものである。横軸にあてはめ  $S_{max}$  を、縦軸に相対誤差を示すとともに、表-3で示した方向スペクトルの形状の一致の程度を主観的に評価した記号を各観測におけるプロットとして示している。

あてはめ  $S_{max}$  は、1から29までの範囲で変動しているが、5から20の範囲に多くのプロットが集まっている。これらのプロットは、高波期間中の、最も波が発達した

状態である最大有義波高記録時(一部、その近傍)におけるものであることを考えれば、発達中の風波に対する  $S_{max}$  を約10とみなす現行の技術上の基準<sup>5)</sup>は、実測値とよく対応しているように思われる。

あてはめ  $S_{max}$  が1あるいは1に近く極めて小さい観測は、図-10-2で示した例からもわかるように、あてはめが困難であったケースである。  $S_{max}$  が1あるいは1に近い値でP2(双峰型)の記号が多く見られるのは、このためである。

主観的に評価した記号と縦軸の値との関係を見ると、常に○記号が×記号やP2記号よりも小さい値となっているわけではなく、主観評価と相対誤差は必ずしも1:1に対応するものではないことがわかる。しかし図の全体としては、○記号は×記号やP2記号よりも下側にプロットが集まっているので、相対誤差による一致度の評価は、ある程度の妥当性を持ったものであることがわかる。

図-11-2は、図-11-1の中から有義波高が6mを越えた特に顕著な高波の16事例を選んで、同様にプロットしたものである。上述した、  $S_{max}$  が約10のところプロットが集まる傾向、および主観的评价と相対誤差との関係に関して、より一層明確にその特性が示されている。なお、有義波高が6mを越えた特に顕著な高波の16事例中には、双峰型P2は2例見られただけであった。このことは、構造物の設計にかかわる顕著な高波においては、双峰型の方向スペクトルとなることは少なく、多くの場合、  $S_{max}$  が約10の光型方向関数をあてはめる現行基準で、実測方向スペクトルをある程度は再現可能であることを意味している。

表-4は、あてはめ  $S_{max}$  と有義波高との関係を、表-3で示した110ケースについてとりまとめたものである。



表一3 方向スベクトル標準型のあてはめ S<sub>max</sub>と相対誤差

年月日時	H13(m)	T13(s)	S <sub>max</sub>	相対誤差	形状評価
90. 8. 10. 20.:	6.29	8.95	3	0.034	○○×○○○××○○
90. 9. 20. 10.:	5.45	9.50	1	0.038	
90. 10. 10. 16.:	4.00	8.70	4	0.044	
90. 10. 8. 20.:	3.57	16.70	2	0.035	
90. 10. 23. 14.:	5.63	13.20	7	0.087	
90. 10. 26. 12.:	5.12	8.70	2	0.029	
90. 11. 4. 18.:	6.70	9.70	1	0.049	
90. 11. 11. 10.:	7.30	10.50	3	0.052	
90. 11. 12. 16.:	5.43	9.90	2	0.030	
90. 12. 22. 18.:	3.53	12.4	4	0.038	
91. 1. 19. 12.:	9.79	12.3	1	0.049	××××××××××××
91. 2. 16. 4.:	8.06	11.5	7	0.052	
91. 3. 23. 14.:	4.59	8.5	2	0.044	
91. 4. 18. 14.:	4.79	12.1	2	0.082	
91. 9. 20. 6.:	4.70	8.1	9	0.046	
91. 10. 2. 0.:	3.81	8.7	3	0.026	
91. 10. 12. 12.:	3.61	10.6	1	0.060	
91. 11. 9. 4.:	3.75	10.5	1	0.027	
92. 2. 26. 0.:	5.40	11.7	1	0.044	××××××××××××
92. 3. 3. 6.:	5.41	10.0	6	0.072	
92. 3. 3. 19.:	4.79	9.3	2	0.042	
92. 3. 22. 14.:	3.83	7.6	9	0.054	
92. 3. 24. 20.:	4.47	9.4	4	0.043	
92. 4. 13. 16.:	3.56	8.0	1	0.070	
92. 4. 16. 14.:	3.54	9.4	1	0.050	
92. 4. 22. 22.:	3.60	8.7	1	0.043	
92. 7. 19. 12.:	3.75	9.5	2	0.067	
92. 8. 9. 12.:	3.75	7.5	1	0.049	
92. 9. 11. 20.:	3.49	11.5	1	0.088	
92. 9. 30. 12.:	3.57	12.8	1	0.031	
92. 10. 21. 20.:	3.52	8.9	7	0.052	
92. 11. 8. 14.:	3.53	10.6	6	0.051	
92. 11. 20. 20.:	4.73	10.6	1	0.056	
93. 1. 16. 18.:	3.64	10.4	1	0.075	××××××××××××
93. 1. 26. 14.:	3.63	9.9	8	0.066	
93. 2. 17. 22.:	4.09	8.9	1	0.073	
93. 3. 2. 20.:	4.20	9.3	1	0.047	
93. 3. 9. 4.:	6.65	13.1	1	0.034	
93. 3. 13. 8.:	4.44	8.9	7	0.062	
93. 3. 29. 14.:	6.04	8.9	1	0.062	
93. 5. 6. 3.:	3.73	7.3	3	0.084	
93. 8. 27. 20.:	4.89	11.0	1	0.084	
93. 10. 31. 0.:	3.55	11.7	1	0.063	
93. 11. 11. 14.:	3.85	9.9	9	0.041	
93. 11. 21. 14.:	3.71	9.7	1	0.057	
93. 12. 21. 20.:	3.90	10.9	1	0.040	

年月日時	H13(m)	T13(s)	S <sub>max</sub>	相対誤差	形状評価
86. 10. 9. 2.:	7.24	12.0	7	0.054	××××××××××××
86. 10. 12. 2.:	5.79	9.6	6	0.041	
86. 10. 22. 8.:	3.56	7.9	3	0.044	
86. 12. 15. 12.:	4.07	10.8	1	0.057	
86. 12. 19. 14.:	6.02		1	0.057	
87. 1. 14. 0.:	3.96	10.2	4	0.034	○○○××××××××
87. 1. 24. 20.:	3.95	8.5	2	0.090	
87. 4. 22. 4.:	3.59	7.6	6	0.039	
87. 6. 13. 10.:	5.33	9.8	2	0.074	
87. 8. 14. 4.:	4.33	14.2	2	0.039	
87. 8. 17. 19.:	6.87	11.4	1	0.048	
87. 10. 1. 13.:	3.96	9.1	1	0.041	
87. 11. 10. 18.:	3.75	13.0	1	0.041	
88. 3. 22. 22.:	8.43	11.6	1	0.052	××××××××××××
88. 3. 31. 2.:	3.90	10.2	1	0.045	
88. 4. 18. 18.:	4.22	9.5	1	0.034	
88. 4. 19. 1.:	6.88	8.7	1	0.051	
88. 5. 2. 16.:	3.78	9.6	1	0.047	
88. 5. 23. 16.:	4.76	10.0	1	0.040	
88. 6. 3. 18.:	4.22	15.5	1	0.054	
88. 7. 31. 18.:	3.76	12.2	1	0.075	
88. 9. 16. 4.:	4.06	10.1	5	0.039	
88. 10. 6. 16.:	4.03	12.5	1	0.032	
88. 10. 31. 20.:	4.03	9.0	7	0.047	
88. 11. 19. 18.:	4.48	10.4	1	0.048	
88. 11. 25. 0.:	4.4	10.4	1	0.047	
88. 11. 29. 22.:	4.68		1	0.047	
89. 1. 11. 18.:	3.62	11.6	2	0.059	○○×○○×××××××
89. 1. 23. 11.:	3.55	10.7	1	0.044	
89. 2. 4. 1.:	4.49	8.0	3	0.032	
89. 2. 4. 1.:	3.30	7.4	1	0.052	
89. 4. 6. 1.:	4.49	8.6	4	0.050	
89. 4. 6. 1.:	4.49	8.6	2	0.050	
89. 5. 6. 1.:	3.07	9.7	1	0.050	
89. 5. 6. 2.:	4.27	10.1	1	0.038	
89. 6. 1. 2.:	4.11	9.8	2	0.038	
89. 8. 8. 1.:	4.66	8.5	8	0.045	
89. 8. 8. 1.:	4.88	8.8	7	0.041	
89. 10. 3. 1.:	3.20	9.0	6	0.041	
89. 10. 8. 1.:	4.41	12.3	1	0.041	
89. 10. 12. 1.:	4.49	9.4	1	0.061	
89. 11. 4. 16.:	4.48	11.7	1	0.037	
89. 11. 15. 2.:	5.40	11.7	1	0.044	
90. 1. 11. 2.:	3.94	9.6	1	0.051	××××××××××××
90. 2. 16. 22.:	3.53	10.1	1	0.033	
90. 3. 9. 10.:	3.63	10.0	3	0.034	
90. 4. 2. 11.:	4.77	10.2	1	0.048	
90. 4. 2. 11.:	4.77	10.7	1	0.048	
90. 4. 5. 11.:	3.35	9.0	2	0.056	
90. 4. 5. 11.:	3.35	9.0	4	0.056	
90. 5. 10. 1.:	3.4	10.7	1	0.036	
90. 5. 10. 1.:	3.4	10.7	1	0.036	

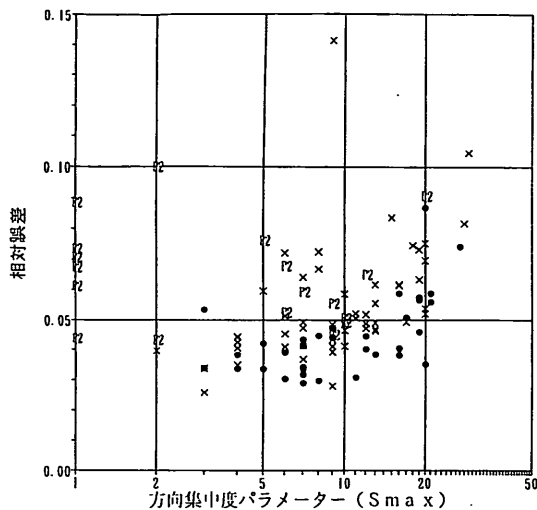


図-11-1 あてはめ  $S_{max}$  と相対誤差の関係 ( $H1/3 \geq 3.5m$ )

110ケース中80ケースであてはめ  $S_{max}$  は6から20の範囲となっており、特に有義波高6m以上の場合は図-11-2にも示されるように、16ケース中12ケースであてはめ  $S_{max}$  は6から20の範囲となっている。すなわち、一般に用いられる風波の  $S_{max}$  を10程度にみなす現行の技術基準は、多くの場合、妥当な結果を与えているようである。

#### 4.5 双峰型方向スペクトルの出現状況

表-5は、ピーク時が双峰型スペクトルとなる事例の状況を取りまとめたものであり、表-3で示される17事例のP2と記載されたケースについて、有義波高順にあてはめ  $S_{max}$  および気象要因を記載している。

表-4で見られた3ケースある有義波高8m以上の顕著高波浪ピーク時には双峰型スペクトルは見られず、比較的低波高が小さいケースが多くなっていることが理解

表-4 あてはめ  $S_{max}$  と有義波高  $H1/3$

ピーク $H1/3$ (m)	あてはめ $S_{max}$					合計
	1	2-5	6-10	11-20	21-	
8.0~			1	2		3
7.0~8.0		1	1	2		4
6.0~7.0		3	4	2		9
5.0~6.0	2	2	9	7		20
4.0~5.0	2	5	13	12	3	35
3.5~4.0	2	8	15	12	2	39
合計	6	19	43	37	5	110

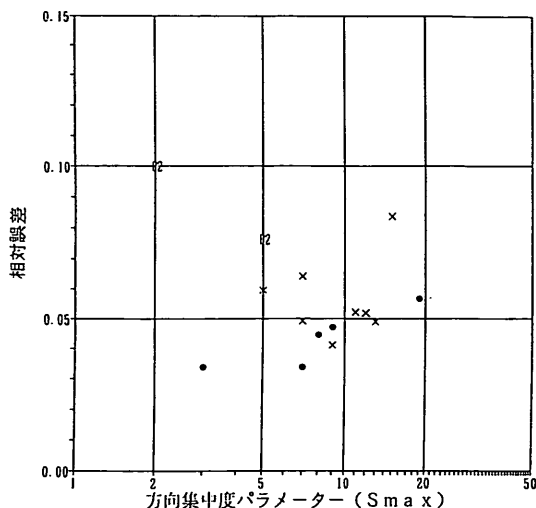


図-11-2 あてはめ  $S_{max}$  と相対誤差の関係 ( $H1/3 \geq 6.0m$ )

される。有義波高が5m以上の4ケースは、2つの台風あるいは台風と前線の組み合わせによるものであった。

### 5. 主成分分析による方向スペクトルの変動特性把握

例えば、4. で検討の対象とした高波ピーク時の方向スペクトルの形状を分類してみると、パターン数は多くはなく、現実に観測される方向スペクトルは、数少ない変動成分の重ね合わせとして、その概略を表現できることが予想される。さらに、そのようなことが可能であれば、それら数少ない変動成分の挙動を調べることで、方向スペクトルの時系列としての変動特性を把握することが可能となる有力な手法となることが期待される。

そこで、ここでは、数多くの要素からなる情報を、数少ない成分で説明しようとする統計的手法である主成分分析(Principal Components Analysis)<sup>10)</sup>の、いわき沖で観測される方向スペクトルへの適用を試みた。

#### 5.1 主成分分析の概要

方向スペクトル  $S(f, \theta)$  を  $L$  個の周波数区分および、 $M$  個の波向き区分で離散量として表現すると、1つの観測結果は  $(L \times M)$  個の直行座標上の点あるいはベクトルとして表される。例えば周波数区分数が48、波向区分数が32の場合には座標軸の数は1536個となり、このような多量の情報の時系列変動を直接把握することは困難である。

主成分分析では、まずこれら時系列観測値の分散が最

表一五 ピーク時双峰型方向スペクトルの出現条件状況

順位	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	起時	$S_{max}$	相対誤差	気象要因
1	7.73	12.2	88. 9.16. 4:	5	0.075	T 8818及び前線性L
2	6.67	11.4	87. 9.17.12:	2	0.099	前線性L及びT 8713
3	5.61	10.6	91.10.12.12:	1	0.060	T 9121及びT 9122
4	5.40	11.5	92. 9.11. 8:	1	0.088	T 9217及びT 9218
5	4.79	9.3	92. 3.19. 0:	2	0.042	南岸L
6	4.27	8.6	92.10. 9.14:	6	0.052	南岸L
7	4.22	9.0	88. 6. 3.14:	12	0.064	前線性L及び二つ玉L
8	4.20	9.3	93. 2.22.20:	1	0.073	L本州横断及び冬型
9	4.09	8.9	93. 2.17.22:	1	0.066	二つ玉L
10	4.07	8.2	90. 3.12.12:	10	0.048	日本海L
11	3.83	7.6	92. 3.21.14:	9	0.054	南岸L及び冬型
12	3.78	9.5	92. 7. 1.14:	6	0.067	T 9203及び崩れのL
13	3.75	9.0	90. 4.23.10:	7	0.058	日本海L
14	3.65	8.4	92. 3.30.12:	1	0.070	南岸L
15	3.56	7.9	86.10.22. 8:	9	0.044	冬型
16	3.54	8.3	92. 4.16.14:	1	0.043	日本海L
17	3.52	7.5	87. 3.25.20:	20	0.090	二つ玉L及び冬型

T : 台風、L : 低気圧、冬型 : 冬型気圧配置

大となる座標軸を見つけだし、この座標軸に沿った単位ベクトルを第1主成分に対応する固有ベクトルと定義する。以下同様に、n番目の座標軸を、第1～第(n-1)の座標軸の全てに対して直行し、かつ、観測値の分散が最大となるという条件のもとで見つけだし、対応する固有ベクトルをもとめる。

理論上は、こうして求められた(L×M)個の固有ベクトルに、それぞれ係数(主成分スコアという)を乗じて総和をとることにより、もとの観測結果を再現できるわけであるが、通常は寄与率上位数個の主成分に対応する固有ベクトルで十分であることが多い。寄与率上位数個の主成分に対応する固有ベクトルの意味する内容を解釈し、さらに各主成分のスコアの時系列変動が、もとの方向スペクトル観測値の変動をうまく説明できるのであれば、本手法は方向スペクトルの変動特性の把握の有効な手段となるであろう。

### 5.2 解析方法

表一に示した高波期間中における方向スペクトルの観測結果(全観測の約21%にあたる約5601観測)を抽出し解析した。

EMEPによる方向スペクトルの推定は、周波数(0.008~0.375Hz)および波向をそれぞれ48および32に分割して実施しているが、計算機の処理能力等を考慮し、スペクトル密度の1つとびの推定値(すなわち周波数お

よび波向をそれぞれ24および16に分割)を用いた。

また、主成分分析を行う場合、分散共分散行列の計算から行う方法と、相関係数行列の計算から行う方法がある。後者はベクトルを構成する要素の中に、異なる単位をもつものがある場合に用いられる方法である。本研究では前者の方法によった。

さらに、解析の結果得られる各主成分の固有ベクトルは、そのユークリッドノルムが1となるように、すなわち単位ベクトルとなるように正規化し、方向スペクトルの単位(m・m・sec/rad)は、固有ベクトルに掛かる係数としての主成分スコアに持たせることとした。

### 5.3 各主成分の意味の検討

解析の結果得られた第8主成分までの寄与率を、以下に示す。第3主成分までで累積寄与率が約57%、第8主成分までで同約82%となり、寄与率上位数個の主成分を用いれば、方向スペクトルの変動の大部分を説明することが出来ると考えられるが、それらの意味を検討する必要がある。

	寄与率	累積寄与率
第1主成分	26.7%	26.7%
第2主成分	22.2%	48.9%
第3主成分	8.4%	57.3%
第4主成分	8.0%	65.3%

第5主成分	6.8%	72.1%
第6主成分	4.0%	76.1%
第7主成分	3.1%	79.2%
第8主成分	2.6%	81.8%

図-12は、第4までの主成分に対する、固有ベクトルをもとの周波数-波向空間に戻し等高線で示したもので、図中の実線は固有ベクトルの成分の正值、点線は負値を表している。例えば、固有ベクトルの成分が正值の場合、当該主成分のスコアとの積が正值ならば、その波向・周波数に対する方向スペクトルの密度を高めることになる。

図-13に、第4までの主成分スコアについて、実線および点線で第*i*主成分に対応する主成分スコア（以下 $Z_i$ と記す）の月平均値の年間変動をそれぞれ示すとともに、有義波高二乗値の月別平均値の年間変動を●付きの実線であわせて示す。

以下に、これら第4主成分までの解釈を行う。

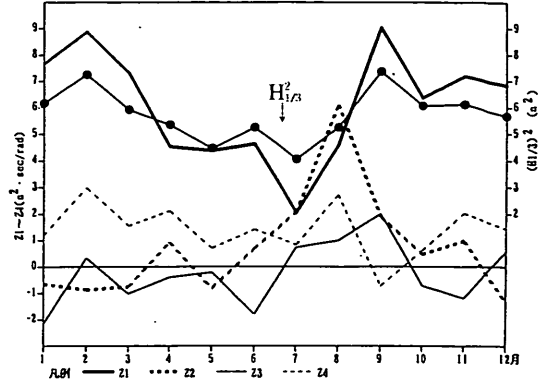


図-13 主成分スコアの月平均値の年間変動

第5以下の主成分については、今回の研究では十分に、その意味する内容を解釈出来なかったが、第4主成分まででは説明しきれない方向スペクトル形状の変動を補足的に説明するものであると考えられる。

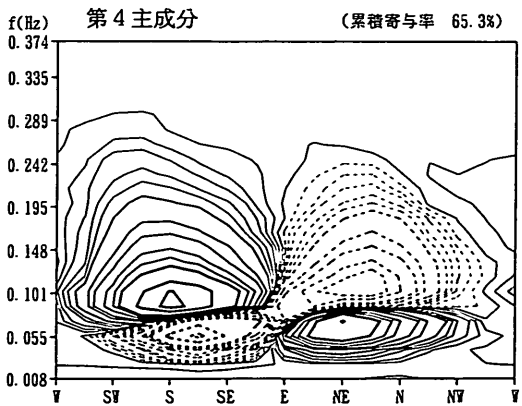
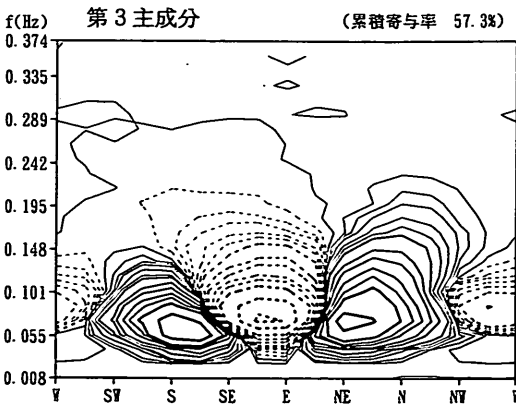
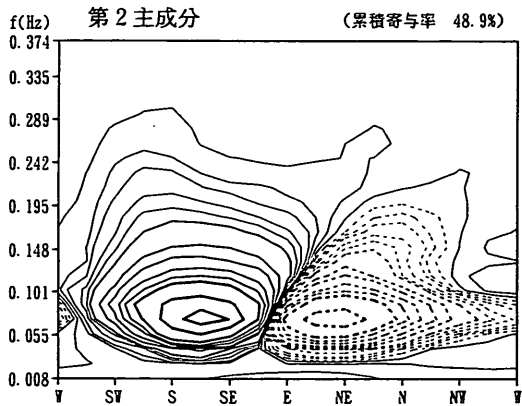
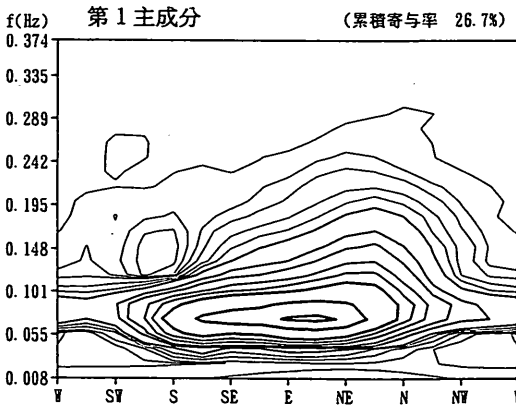


図-12 各主成分に対する固有ベクトル



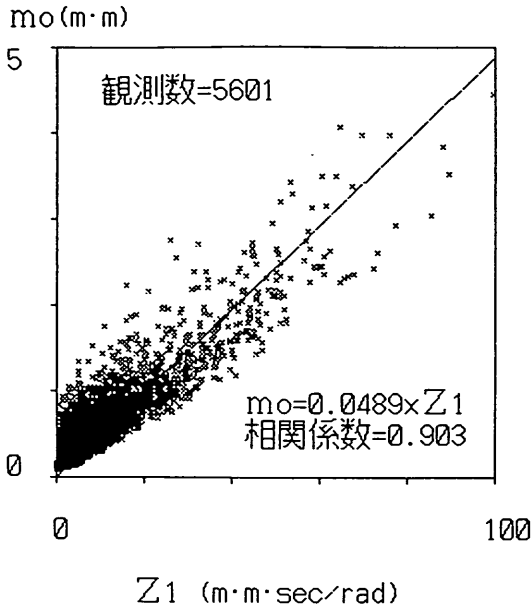


図-14 方向スペクトル積分値 $m_0$ と第1主成分スコアの関係

(1) 第1主成分について

各観測毎の、方向スペクトルの積分値 $m_0$ と $Z_1$ の関係を図-14に、 $m_0$ と $H_{1/3}$ の関係を表-6にそれぞれ示す。

どちらの関係も強い相関があり、図-13にみられる有義波高二乗値の月平均値が、 $Z_1$ の月平均値の変動と近い変動を示すのは、各観測毎に $m_0$ を介して $Z_1$ と $H_{1/3}$ の間に相関があることから説明できる。

また、対応する固有ベクトルの形状は、図-6および図-7に示した方向スペクトルの年平均値および月別平均値の形状と極めて似たものとなっている。

以上のことから、常に正值を示す $Z_1$ は、波の平均エネルギーに関連する主成分であると考えられる。

(2) 第2主成分および第3主成分について

図-13によれば、 $Z_2$ の月平均値が負の値となる12月～3月は、図-4にみられた月平均の波向別エネルギー分布のピークがE～N方向にある時期と一致する。また、スコアが正の値となる4月および8～12月は同様に、月平均の波向別エネルギー分布のピークがS～E方向にある時期と一致する。

そこで、 $Z_2$ と第1ピークの波向およびスペクトル密度の関係を整理すると図-15(a)及び(b)のようになる。 $Z_2$ は、正または負の値をとり、S～E方向に第1ピークがみられるときに正值、E～N方向に第1ピークがみ

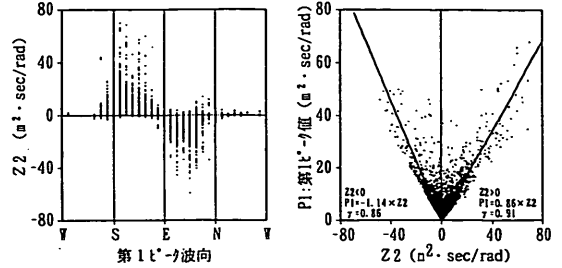


図-15 方向スペクトルのピーク値と第2主成分のスコアの関係

れるときに負値となる傾向がある。また、第1ピーク値と $Z_2$ の間にも関連性がみられる。このことから、第2主成分は、エネルギー分布のピークがS～E系かあるいはE～N系にあるときに、その絶対値が大きくなる傾向にある主成分であり、第1ピークの波向のE方向からの偏差が南よりか北よりかを、大まかに説明する主成分であると考えられる。

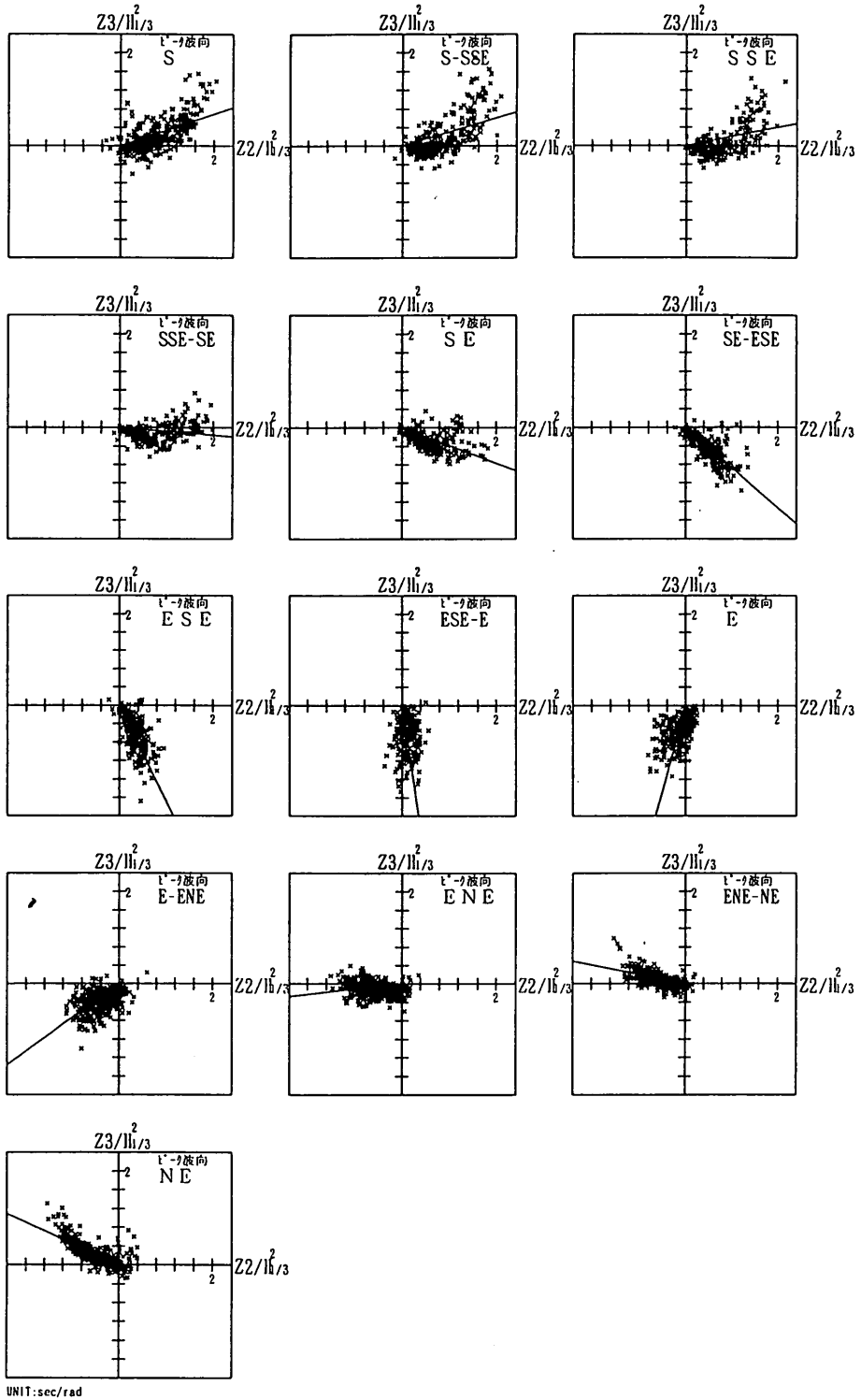
次に、 $Z_3$ の月平均値の変動をみると、月平均の波向別エネルギー分布のピーク位置の傾向とはあまり相関性はみられない。しかし、第3主成分に対応する固有ベクトルの形状をみると、第2主成分に対する固有ベクトルが2つのピークをもつものに対して、SW～SEおよびENE～NW方向に正值、SE～ENE方向に負値の3つのピークをもつことから、エネルギー分布のピークがS～E系からE～N系(あるいはその逆)に変化するときに、第2主成分では表しきれない形状を補完するように変動する主成分ではないかと考えられる。

そこで、方向スペクトルのピーク波向別に、 $Z_2$ および $Z_3$ をプロットしてみると図-16のようになる。ただし、ピーク波向が、SからWを経てNEまでの間は、両スコアの相関を把握できるほど観測例が多くはないので省略した。図中の直線は最小二乗法で求めた( $Z_2, Z_3$ )の分布の傾きであり、ピーク波向とこの2つの主成分スコアとの間に関連があることがわかる。さらに、 $Z_2-Z_3$ 座標の原点からの距離である $\sqrt{Z_2^2+Z_3^2}$ とピーク値の関係を図示すると図-17のようになり、 $Z_2$ と $Z_3$ の絶対値はピーク値の大きさとも関連があることがわかる。

以上のことから、第2主成分と第3主成分は、方向スペクトルのピーク波向きおよびピーク値と関連する主成分であると考えられる。

(3) 第4主成分について

第4主成分の意味の解釈は次のようにして行った。まず、方向スペクトルを、波向はEを境にW～S～E



図一六 ピーク波向別の第2および第3主成分のスコアの関係

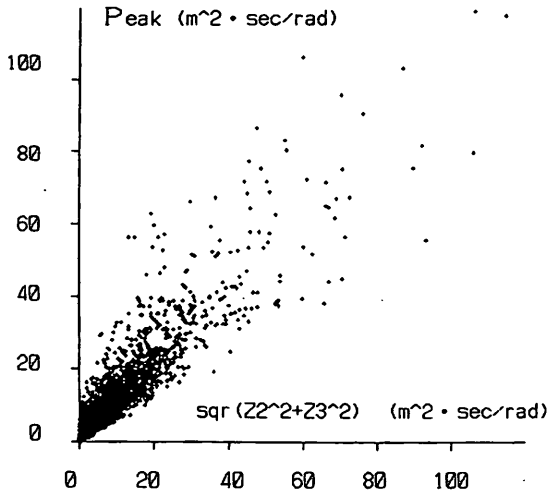


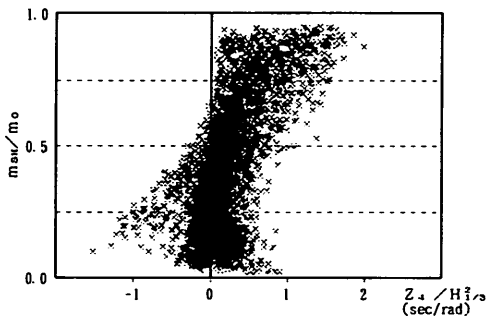
図-17 方向スペクトルのピーク値と第2および第3主成分のスコアの関係

のS系とE～N～WのN系に、さらに周期は12秒を境に高周波側と低周波側に、合計4つの領域に分割する。これは、第4主成分に対する固有ベクトルの形状を考慮してのことである。次に、方向スペクトルの各領域の部分積分値が、全積分値 $m_0$ に占める比率を求め、 $Z_4$ との

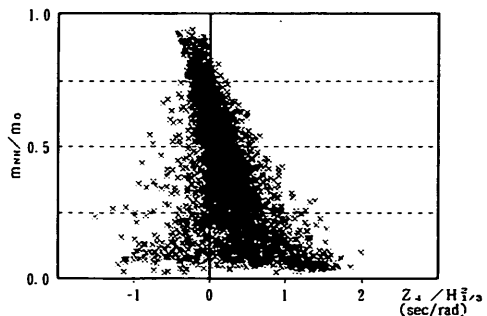
関係をそれぞれ整理した。図中の $m_{SL}, m_{SH}, m_{NL}, m_{NH}$ は、それぞれ、S系の低周波側、S系の高周波側、N系の低周波側、N系の高周波側の方向スペクトルの部分積分値である。

図-18-1(a)および図-18-(b)は、方向スペクトルの高周波側のエネルギー比率と $Z_4$ の関係をしめたものである。S系の高周波側にエネルギー集中するときに、 $Z_4$ が正の方向に増大する傾向が見られるが、N系の高周波側にエネルギー集中するときは、S系の高周波数側の場合のようには顕著な特徴は見られない。いずれにしても、こうした高周波側のエネルギーの集中は、第2および第3主成分の固有ベクトルの形状から類推すると、これら主成分の組み合わせでも説明できるので、第4主成分と結びつけて結論付けることは出来ない。

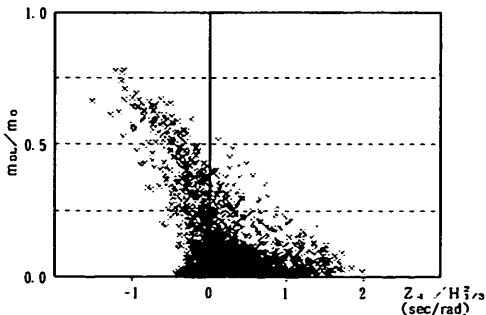
一方、図-18-1(c)および図-18-(d)は、方向スペクトルの低周波側のエネルギー比率と $Z_4$ の関係を示したものである。N系の低周波側にエネルギーが集中する場合は $Z_4$ が正の方向に増大する傾向があるが、逆に、 $Z_4$ が正の方向に増大するときに必ずしもN系の低周波側にエネルギーが集中するとは限らない。これに対して、S系の低周波側にエネルギーが集中する場合には $Z_4$ が負の方向に絶対値が増大する傾向が顕著である。



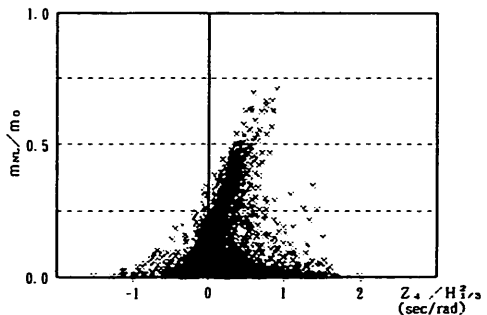
(a) S系高周波側のエネルギー比率 $m_{SH}/m_0$ と $Z_4$ の関係



(b) N系高周波側のエネルギー比率 $m_{NH}/m_0$ と $Z_4$ の関係



(c) S系低周波側のエネルギー比率 $m_{SL}/m_0$ と $Z_4$ の関係



(d) N系低周波側のエネルギー比率 $m_{NL}/m_0$ と $Z_4$ の関係

図-18 方向スペクトルの(領域別エネルギー部分積分値)/(全積分値 $m_0$ )と $Z_4$ の関係



よって、第4主成分は少なくとも、S系の低周波側のエネルギーの集中に関連する主成分であると考えられる。

#### 5.4 主成分スコアの時系列変動

図-19は、波浪系がS系からE系に変化した代表的な観測事例として、1988年9月3日から20日にかけての各主成分スコアの時系列変化を、有義波諸元、周波数スペクトルおよび方向分布の時系列変化とともに示したものである。有意波高と $Z_1$ の変動、およびピーク波向の変化と $Z_2$ および $Z_3$ の変動に関して、5.3の(1)および(2)で述べた特徴がよく読み取れる。特にピーク波向については、

$Z_3$ が正の値を保ちつつ、 $Z_2$ の符号が正から負へ転じた9月16日12時頃にピーク波向きがS系からE系へ急激に変化しているが、このことは図-18に示した傾向と一致している。第4主成分に関しては、9月14から16日にかけてS~SE方向の周期約1.5秒前後の長周期側にエネルギーの高まりが見られるが、この期間は5.3(3)で述べたように $Z_4$ の値が、負の方向に絶対値が増大していることが確認される。

このように、各主成分のスコアは、全くランダムではなく系統的に変動するとともに、第4主成分までのスコアの変動だけでも、この期間の方向スペクトルの変動特性の概略を時系列で把握出来ることが示された。

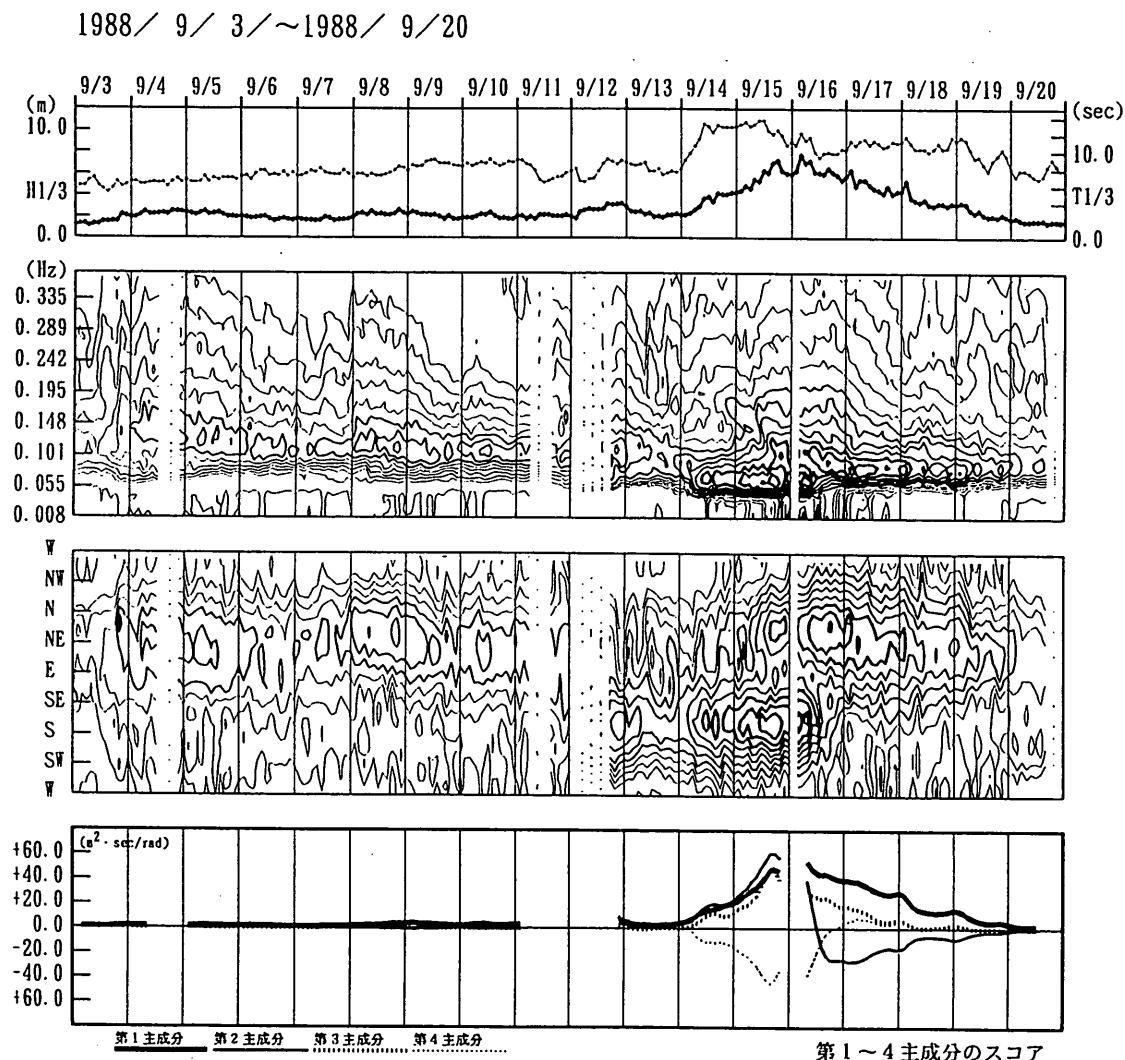


図-19 主成分スコアの時系列変化の一例 (1988年9月3日~20日)

## 6. まとめ

- ① 周波数および波向に関して方向スペクトルを積分して得られる波向別および周期別のエネルギー分布の年別・月別平均値を求めて、経年変動や季節変動を明らかにした。エネルギー分布の月別平均値は、年毎にその月に生じた気象擾乱によって大きく変動することが示された。
- ② 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諸元がどの程度多様な方向スペクトル特性を代表しうるかに関して検討を行った。この結果、特に双峰型方向スペクトル形状の場合は、方向スペクトルのピーク波向と平均波向の相関は極めて低くなることが示された。波向は、その定義によって大きく異なった方向を示すことがあるので、波向に関する代表諸元の選定にあたっては、その目的にあわせた適切な選定を行う必要がある。
- ③ いわき沖で観測された高波ピーク時の方向スペクトルを、現在、港湾設計で最も一般的に標準スペクトル形状として採用されている光易型方向関数と比較した。波高ピーク時における双峰型方向スペクトルの出現頻度は、あまり高くなく、特にピーク時有效波高8 m以上の3ケース中には双峰型方向スペクトルは見られなかった。また、最小自乗法によって求めた適合 $S_{max}$ としては10程度のケースが最も多かったので、こうした観点からは、光易型方向関数の採用は、波高ピーク時においては、妥当な場合が多いことが示された。ただし、スペクトル形状は、実測値と光易型方向関数は完全には一致せず、主観的形状評価から見ると形状が異なっていることが多く、最小自乗誤差からの評価として3%から14%程度の誤差が見られることが示された。
- ④ 方向スペクトルの観測値をベクトル時系列と見なして主成分分析を行った。その結果、上位数個の主成分で、方向スペクトル変動の多くは再現可能であることが示された。第4主成分までの主成分を用いただけでも、波の発達から減衰の過程における方向スペクトルの時系列変化の概要を把握するためには有効な手法であることが示された。なお、各主成分の物理的意味を考察すると、第1主成分は波の平均エネルギーに関連する主成分であり、第2主成分と第3主成分は、方向スペクトルのピーク波向およびピーク値に関連する主成分であると考えられる。また、第4主成分は、少なくともS系の低周波側にエネルギーが集中するときに、その意味が明確となる主成分であると考えられる。

## 謝辞

最後に、いわき沖における定常観測を担当されてい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皆様に対して、改めて謝意を表します。

(1995年11月30日受付)

## 参 考 文 献

- 1) 永井紀彦・橋本典明・浅井 正：沖波の方向スペクトルの出現特性 (第1報)，港湾技術研究所報告，第32巻第2号，PP.45~113，1992。
- 2) 広瀬宗一・高橋智晴：スペクトル時系列の統計解析，第28回海岸工学講演会論文集，PP.173~177，1981。
- 3) 光易 恒：風波のスペクトルの発達(2) —有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について—，第17回海岸工学講演会論文集，PP.1~7，1970。
- 4) Mitsuyasu, H. et al. : Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Jour. Physical Oceanography, Vol.5, pp.750~760, 1975.
- 5) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準および同解説，1989
- 6) 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の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，PP.3~25，1993。
- 7) 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，PP.53~92，1981。
- 8) 永井紀彦・菅原一晃・清水勝義・橋本典明：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 1993)，港湾技術研究所資料，No. 796，1995。他に、港湾技術研究所資料，No.770，No.745，No.721，No.712，No.666，No.642，No.612。
- 9) 合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技術研究所資料，No.230，45p，1975。
- 10) 河口至商：多変量入門I，森北出版株式会社，pp.35~51，1985。