

# 港湾技研資料

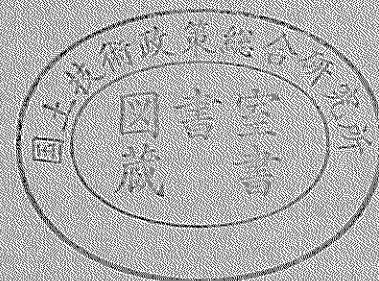
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 783      Sept. 1994

島による遮蔽を受ける海洋波の方向スペクトルの出現特性  
— 新潟沖の観測結果 —

永 井 紀 彦  
橋 本 典 明  
浅 井 正

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

1. はじめに .....	4
2. 新潟沖波浪観測地点 .....	5
2.1 観測施設の概要 .....	5
2.2 解析対象期間と解析方法 .....	5
3. 現地観測結果による新潟沖の方向スペクトルの出現特性に関する検討 .....	5
3.1 新潟沖周辺海域の気象・海象特性 .....	5
3.2 方向スペクトル形状におよぼす地形の影響 .....	7
4. 遮蔽された方向スペクトルの有する特性に関する数値的検討 .....	8
4.1 数値的検討方法 .....	8
4.2 方向スペクトル形状が波向統計量に与える影響 .....	10
4.3 方向スペクトル形状が波向別波浪頻度分布に与える影響 .....	17
5. おわりに .....	20
参考文献 .....	21

# Sheltering Effect of Offshore Island on the Directional Wave Spectra

— Field Observation off Niigata —

Toshihiko NAGAI \*

Noriaki HASHIMOTO \*\*

Tadashi ASAI \*\*\*

## Synopsis

Sheltering effect of offshore island on the directional wave spectra is studied using the field data at the Niigata-offshore wave observation station, one of the NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS) stations. The station is located at the depth of 35m and faced to the Japan Sea. Due to the effect of the Sado-Island, 50km west from the Niigata-coast, incident waves in between NW and W are shelterred at the station.

Concluding remarks of this report are shown as follows :

- (1) Asymmetry or bi-modal shaped directional spectra are observed at the Niigata-offshore station, due to the sheltering effect of the Sado-Island.
- (2) At the Niigata-offshore station, waves from NW and W are observed more times than the waves from the directions in between, for the sheltering effect.
- (3) When offshore deep sea wave direction is observed in between NW and W at the Haziki-zaki wave station, wave direction at the Niigata-offshore station shows either NW or W, which is nearer.
- (4) Numerical simulations are carried out, using the Mitsuyasu's directional distribution function. The results explain above properties caused by the Sado-Island.
- (5) Directional properties off Niigata can be explained more precisely, if diffraction from Sado-island is taken into account in the simulations.

Key Words :

NOWPHAS, Directional wave spectrum, Wave observation, Sheltering effect

---

\* Chief, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

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

\*\*\* Member, Environmental Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

(Ex-Member, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division)

# 島による遮蔽を受ける海洋波の方向スペクトルの出現特性 — 新潟沖の観測結果 —

永井 紀彦\*  
橋本 典明\*\*  
浅井 正\*\*\*

## 要 旨

海洋波の方向スペクトルは、有義波諸元や周波数スペクトルと比べて明らかにされていない点が多く、方向集中度パラメータなどのパラメータを用いて便宜的にその特性を表現しているのが現状である。このため、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS）の一環として、現在、第一港湾建設局新潟沖波浪観測地点と第二港湾建設局いわき沖波浪観測地点では、多方向不規則波の観測が定常的に実施されている。本資料では、新潟沖波浪観測地点（水深  $h = -35\text{m}$ ）で測得された方向スペクトルの特性に与える佐渡島の遮蔽効果を、現地観測データを用いて検討している。さらに、遮蔽により方向分布形状が歪んだ場合に方向スペクトルの示す特性を数値的に検討している。

本資料で得られた主要な結論は次に示すとおりである。

- (1) 新潟沖で取得された海洋波の方向スペクトルは、佐渡島の遮蔽を受けて、エネルギーの方向分布がW~NW方向で小さくなることが確認された。遮蔽を受けた方向スペクトルは、ピークに対して非対称な形状を示したり、2山型の分布形状を示す。移動性の低気圧など、波向が短時間に大きく変化する気象擾乱が発生した場合に、この特性が顕著に現れる。
- (2) 遮蔽領域の端部の方向から入射する波の出現頻度は大きい。これに対して、遮蔽の影響を受ける範囲からの波の出現頻度は小さくなる。遮蔽域内にあたる波向をもつ波浪が観測される場合、有義波諸元の値が小さくなる傾向が認められた。とくに、有義波周期についてその影響が大きい。
- (3) 佐渡島の弾崎で遮蔽領域内にあたる波向の波浪が観測された場合、新潟で観測される波向は遮蔽領域のうち弾崎の波向の近い方の端部の方向を示す。波向別の波浪出現頻度が遮蔽域の両端で大きくなるのはこのためである。
- (4) 光易型方向関数から遮蔽域内の波エネルギーを取り除いたものを遮蔽を受けた後の方向スペクトル形状と仮定し、数値的検討を行った。この結果、遮蔽の影響を受ける前後での波向や波向別波浪頻度分布の変化を実際の現象と対比して説明することができた。
- (5) 上記の方向関数に対しては、平滑化を行った方が数値的検討結果と観測結果との対応がよい。これは、新潟沖で観測された方向スペクトルでは、佐渡島を通過後の伝播時の回折の効果が無視できないためである。

キーワード：ナウファス、全国港湾海洋波浪情報網、方向スペクトル、波浪観測、遮蔽効果

\* 海洋水理部 海象調査研究室長

\*\* 水工部 海洋エネルギー利用研究室長

\*\*\* 海洋水理部 海域環境研究室（前 海象調査研究室）

# 1. はじめに

沖合で観測される海洋波の方向スペクトルの出現特性は多様であり、設計等に用いられる標準的な方向スペクトルでは必ずしもその特性を表現しきれない場合が多い。著者ら<sup>1)</sup>はこれまでも、福島県いわき沖で得られた波浪観測データの解析結果から、多様な気象擾乱が当該海域の多様な方向スペクトルの出現特性を特徴づけていることを確認している。

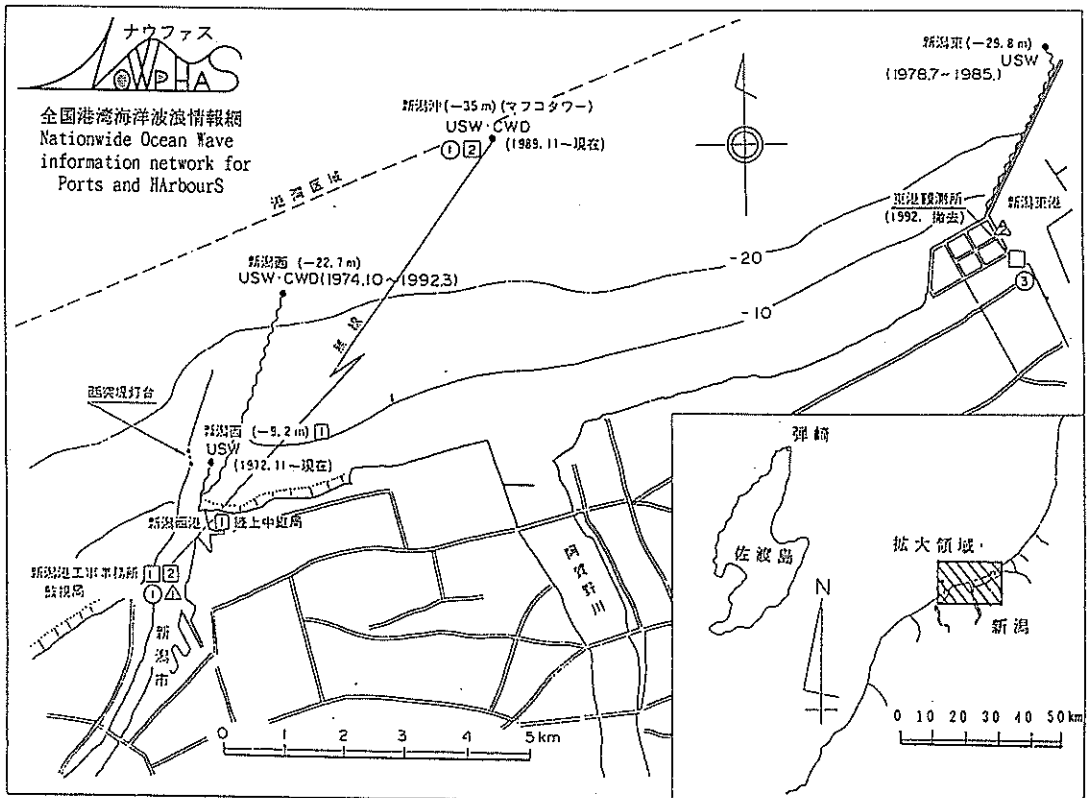
一方、沖合いの波浪は、沿岸域に到達するまでに、当該海域の地形や周辺の構造物等の影響を受ける。この結果、沿岸域で観測される方向スペクトルは、沖合いの方向スペクトルとは異なった特性を示すようになる。例えば、新潟近海では、佐渡島が新潟沿岸の方向スペクトルの出現特性に何らかの影響をおよぼしていると考えられ、これまでも興味深い研究が主として有義波諸元や波浪推算結果を用いて検討されてきた。

このような佐渡島による波浪の遮蔽効果に関する最初の定量的な検討は本間ら<sup>2)</sup>により行われ、佐渡島の入川と新潟西海岸および新潟東港で得られた風と波浪観測データから、新潟海岸におよぼす佐渡島の遮蔽効果が少なく

とも定性的には方向分散の観点から説明できることを明らかにしている。

また、その後発表された中田ら<sup>3)</sup>の研究では、佐渡島の弾崎と新潟東港および西港の観測データを用いた検討から、周波数スペクトルが佐渡島の遮蔽効果と局所的な風の影響によりどのように変化するかを示す興味深いデータを提示し、こうした変化を再現するには方向分散の他に局所風による波浪の発達・減衰の影響を加味した検討が必要であることを述べている。

上記の本間らや中田らの研究では新潟海岸の限られた少数地点におよぼす佐渡島の遮蔽効果を検討したものであり、新潟海岸全体におよぼす効果を面的に検討したのではない。そこで、山口ら<sup>4)</sup>は、秋田～能登半島を結ぶ境界線以南の小領域について、佐渡島が存在する場合と存在しない場合の2通りについて、特定擾乱下で波浪推算を行い、両者の比較から佐渡島が新潟沿岸の波高分布におよぼす遮蔽効果を検討した。なお、山口らの研究で用いられた数値モデルの境界条件には、特定気象擾乱下で実施した日本海全体の波浪推算結果を用いている。山口らは、これらの推算結果から遮蔽効果の影響範囲が外洋から侵入する波浪の来襲方向によって変化し(佐渡



図一 新潟沖波浪観測地点位置図

島と波向きとの関係に依存して佐渡島の波向に対する投影長が変化するため)、とくに冬季季節風時の波高が比較的小さい減衰期において佐渡島の遮蔽効果がより有効にはたらく場合があることを明らかにしている。しかしながら、山口らが対象とした気象擾乱では、主としてN方向の風が卓越するため外洋からの波浪が直接新潟～北陸海岸に襲撃することとなり、佐渡島による遮蔽効果があまり顕著ではない。より多様な実際の現象を把握するためには、あるいは、佐渡島の遮蔽の影響をより詳細に検討するためには、さらに遮蔽効果が顕著に現れる他の気象擾乱を対象とした検討も必要であろう。

いずれにしても、上記の3つの研究では主として有義波諸元や特定の波浪推算結果にもとづいて検討を行っているため、地形条件が波エネルギーの方向分布に与える影響の検討は必ずしも十分であるとは言えない。実際の現象を詳細に把握するためには、地形条件が波浪におよぼす影響を現地観測によって得られた方向スペクトルによって検証する必要がある。

第一港湾建設局では、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス: NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS)における波浪観測<sup>6)</sup>の一環として、1989年10月に新潟港阿賀野川河口から北4.7km沖合、水深-35mの地点に高精度な方向スペクトル観測を実施する観測施設を設置し、現在も継続的に観測を実施している<sup>7)</sup>。本研究は、本観測施設で測得された方向スペクトルを用い、佐渡島等の地形条件が波浪におよぼす影響について、対応する気象要因等を考慮しながら検討を行ったものである。また、既往の研究成果から得られているいくつかの知見についても、方向スペクトルの観点から再検討している。

## 2. ナウファス新潟沖波浪観測地点

### 2.1 観測施設の概要

運輸省港湾局およびその関係機関の相互協力のもとに構築運営されているナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の一貫として、とくに波浪の方向スペクトルの詳細な検討を目的として、第一港湾建設局が設置した新潟沖波浪観測地点(以下、新潟沖と呼ぶ)は、図-1に示す新潟港阿賀野川河口から北4.7km沖合、水深-35m地点(北緯38° 00' 07", 東経139° 07' 46")である。新潟東港は本観測地点からENE～E方向に約8.5km離れたところに位置している。佐渡島は本観測地点からみてNW～W方向に位置し、観測地点との距離は約50kmである。観測地点の背後にはNE～SW方向に海岸線がのびている。

観測機器は、図-2に示すように1辺が25.0mの正三角形の各頂点に設置された3台の超音波式波高計と、その重心位置に設置された超音波式水平2成分流速計および水圧計から構成されている。表-1は波浪観測機器の取り付け位置を相対座標で示したものであり、観測機器の仕様は表-2のとおりである。波浪観測は毎偶数正時前後10分間の計20分間実施され、サンプリング間隔0.5秒でA/D変換し、データが収録されている。

### 2.2 解析対象期間と解析方法

解析対象期間は1989年11月から1991年6月までの20ヶ月分であり、2.1に示した最大6成分の観測データを用いて、ベイズ法<sup>8)</sup>により方向スペクトルの推定を行った。この方法は他の方向スペクトル推定法に比べて推定精度や安定性に優れた方向スペクトル推定法であり、見かけのピークの発生やピークの分裂といった誤った現象が生じにくい。また、方向スペクトル解析と同時に、対象期間内の有義波諸元や代表波向等の波浪統計諸元の整理も行った。

なお、本報告では方向スペクトルのエネルギーの最大値が示す方向(以下、ピーク波向と呼ぶ)を代表波向として用いている。これは、本報告で対象とする方向スペクトルは、遮蔽等の影響により波のエネルギーの方向分布が歪んだ形状を示す可能性が高いため、平均波向を代表波向とみなすのは必ずしも妥当ではないと判断したためである。なお、平均波向等の他の波向諸元の計算については、合田<sup>9)</sup>の提案した共分散法により実施した。

## 3. 現地観測結果による新潟沖の方向スペクトルの出現特性に関する検討

### 3.1 新潟沖周辺海域の気象・海象特性

新潟沖周辺の沿岸では、冬季に発達する冬型気圧配置によってNW方向からの季節風が卓越する。このため、代表的な高波浪は冬季に観測されることが多く、ピーク波向もNW～NNW方向に分布する。これとは逆に、夏季にはS方向からの季節風が発達するため、新潟沖ではほぼ静穏な状態が続く。秋季や春季では、台風や日本海を通過する移動性の低気圧が高波浪の原因となることが多く、N寄りを中心とした波浪が発達する。また、ピーク波向として観測されることは少ないが、ENE方向から入射する微小な波エネルギーが冬季を通して方向スペクトル上に認められる。

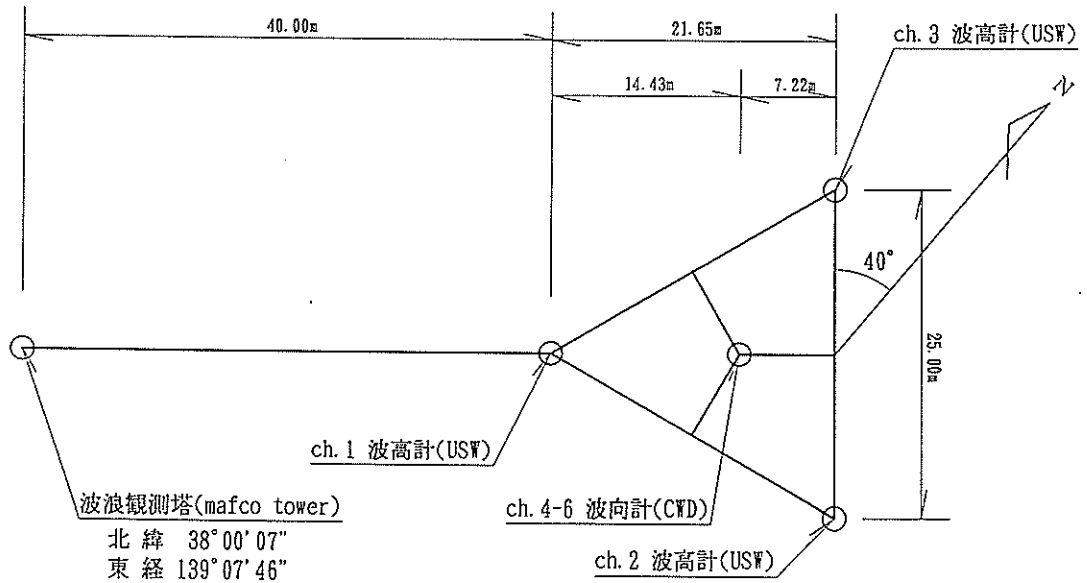


図-2 観測機器の取付平面図

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	水位 $\eta$	超音波式波高計	-11.057	-9.278	-33.0
ch. 2	"	"	13.563	-4.936	-33.0
ch. 3	"	"	-2.506	14.215	-33.0
ch. 4	流速(x方向成分) $u$	超音波式流速計	0.000	0.000	-30.0
ch. 5	流速(y方向成分) $v$	"	0.000	0.000	-30.0
ch. 6	水圧 $p$	水圧式波高計	0.000	0.000	-30.0

表-2 波浪観測機器の仕様

	波高計	流速計・水圧計
機種	超音波式波高計 (TU-33B)	超音波式流速計 (TP-21A)
測定範囲	0~20m	成分流速 0~±3m/s 水圧変動 0~±0.5kgf/cm <sup>2</sup>
測定精度	1cm±0.5cm	流速 ±4% 流向 ±5°



### 3. 2 方向スペクトル形状におよぼす地形の影響

#### (1) 佐渡島の遮蔽効果

図-3(1)および(2)は、それぞれ、1990年12月の1ヶ月間に観測された有義波高および有義波周期のピーク波向別の散布図を示したものである。両図より、高波浪時の波向は主としてNW~NNW方向とWSW方向の2つの方向に分布していることがわかる。新潟沖周辺では冬季を通してNW方向を中心とした季節風が卓越することを考えると、W~NW方向から来襲する波浪は佐渡島による遮蔽の影響を受けているものと考えられる。すなわち、佐渡島から新潟沖までの吹送距離があまり大きくないため、遮蔽の影響は有義波高と有義波周期の分布に顕著に現れ、波高・周期とも小さな値を示している。

図-4は、1990年12月2日から12月3日の間に観測された方向スペクトルを周波数に関して積分した値を時系列順に並べ、等値線図で表示したものである。図中の等値線はエネルギー密度を対数変換した値を等間隔で示したもので、図上の棒グラフはスペクトルの積分値を示す。図より、2日2時頃よりW方向から来襲する波浪が発達するが、16時頃にいったん減衰する。その後、全体的にエネルギーが小さい状態が数時間続き、再び波浪の発達がみられるが、このときの波向はNW方向に変化している。図-5は図-4に示した観測期間の天気図を示したものである。対象期間中は台風9028号崩れの日本海低気圧の通過にともない風波が一貫して発達していたと考えられ、佐渡島の遮蔽の影響以外の要因による波浪の発達・減衰・発達の変動ならびに波向の変動は考えにくい。したがって、図-4は、W~N方向にピーク波向が変化しながら発達した波浪が、佐渡島によりNW方向の波エネルギーが一時的に遮蔽された結果とみなすことができよう。このように、台風のような移動性の低気圧が佐渡

島の北を通過する場合には、W~N方向にピーク波向が変化するため、遮蔽の効果が顕著に現れるようである。

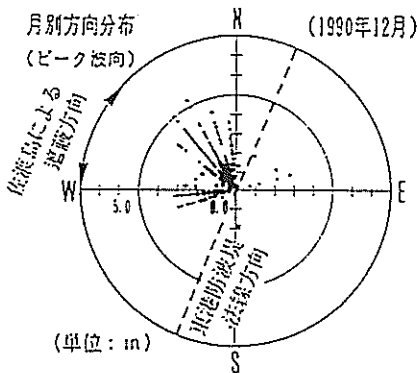
このほか、方向スペクトルの分布形状について種々整理した結果、日本海を通過する低気圧が佐渡島の北の遠くに位置するか、長い時間に渡り停滞する場合は方向スペクトルの分裂が明確に現れるが、比較的新潟沖に近いところに位置する場合には、明瞭には単一ピークしか判別できない傾向がみられた。

図-6は、冬型の気圧配置の方向スペクトルの経時変化を示したものである。図-7は当該期間内の天気図を示したものである。図のように、冬型の気圧配置により発達した波浪は、遮蔽の影響が読みとりにくい。これは、方向分散と屈折・回折の複合的な作用により方向分布が平滑化されたため、遮蔽範囲からの来襲波がみられるようになるためであろう。しかしながら、図-7の天気図から判断して、風向はNWから徐々にW寄りに変化していくものと考えられるのに対し、ピーク波向はNNWではほぼ一定であることから、佐渡島からの来襲波は図-4の場合と同様に遮蔽されているものと考えられる。このような風向とピーク波向の不一致や方向分布形状の歪みについては、今後さらに波浪推算法等を用いて検討して行きたい。

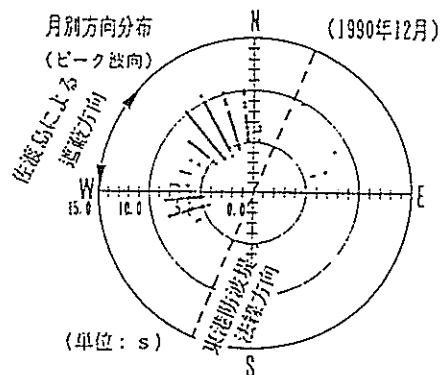
#### (2) ENE 方向からの波エネルギーの来襲

図-8(1)~(3)は1990年11月10日~11日にかけて発達した高波浪時の方向スペクトルの経時変化を示したものである。このときの気圧配置は強い冬型を示し、対象期間内ではNWを中心とした風が発達していたと考えられる。

図-8(1)の方向スペクトルには、NWとWSWの2つの方向にピークがみられる。NW方向のピークに対応するスペクトルの方向分布形状はE側とW側でやや非対称



(1) 有義波高



(2) 有義波周期

図-3 有義波諸元の方向別散布図(12月)



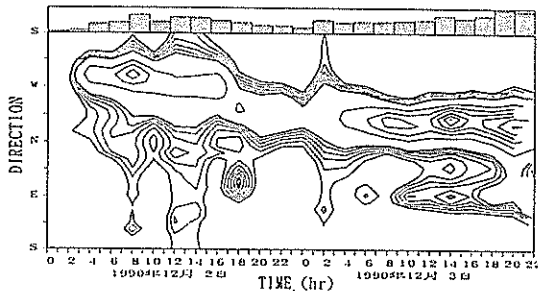


図-4 方向分布の経時変化図 (1990年12月2日~3日)

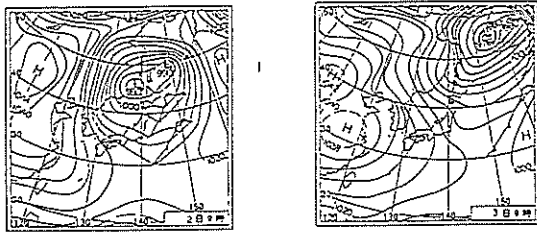


図-5 対象期間の代表天気図 (1990年12月2日~3日)

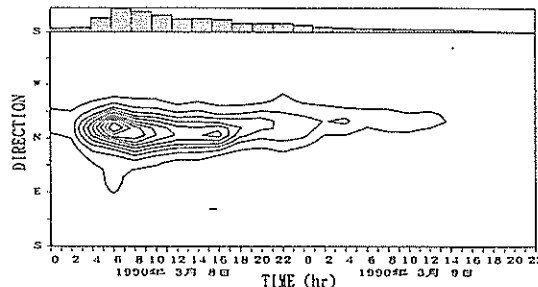


図-6 方向分布の経時変化図 (1990年3月8日~9日)

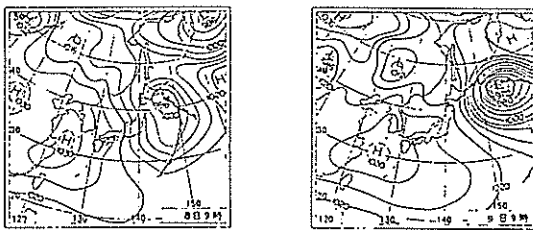


図-7 対象期間の代表天気図 (1990年3月8日~9日)

であり、W側の分布形状の方が急峻な形状を示している。また、WSW方向のピークについては周波数が大きく、あまり顕著な波浪ではない。これは佐渡島によりNW~WSW方向から来襲するエネルギーが遮蔽されたためピークが2つ分離されたものと考えられる。

図-8(2)は、図-8(1)中のNWの波浪成分の波向が

ややN寄りに変化し、新たにENE方向に顕著な2つ目のピークが現れている。2. で述べたようにENE方向には新潟東港が位置している。防波堤から観測地点までの吹送距離は8.5kmと小さく、周期5s以上の風波の発達は考えにくい。したがって、この2つ目のピークは東港防波堤からの反射波によるものと考えられる。観測地点と東港防波堤(延長3km, 法線方向SSW~NNE)との地理的な関係から判断すると、東港防波堤にNW~NNW方向から波が来襲する場合には、観測地点に反射波が到達しやすく、この方向は図-8(2)の観測結果と一致する。

図-8(3)にも、NNW方向とE方向に2つのピークがみられるが、それぞれのピーク周波数は異なり、E方向ピークはNNW方向のピーク周波数よりもやや高周波数側に現れている。

図-8(2)および図-8(3)にみられるE方向のピークについては、局地風の影響も考えられる。中田ら<sup>3)</sup>は佐渡島の遮蔽の影響を調査する場合には、新潟沖周辺の局地的な風により発達する風波を考慮する必要があることを指摘している。また、山口ら<sup>4)</sup>は波浪推算を用いて、季節風の発達する場合に佐渡島と新潟の間の海峡に沿ったENE方向の局地風が発生することを示している。

しかしながら、中田らの観測結果では、ENE方向は海岸線により吹送距離が小さいことから、局地風の影響は波浪の周波数が $f > 0.156\text{Hz}$  ( $T < 6.4$ 秒)程度の高周波数側に現れている。これに対し、図-8(2)および(3)中のENE方向の波浪エネルギーの卓越周波数は0.1Hz程度である。本研究で対象とした新潟沖波浪観測地点は、中田らの観測地点と近接した地点であるものの、このように卓越周波数が異なることを考えると、図-8の結果は局地風の影響による波浪とは考えにくい。

なお、今回解析した観測値は東港防波堤の工事期間中のものであり、その後、東港には消波工が施工されている。すなわち、解析対象期間では東港防波堤の反射率が比較的大きく、新潟沖の方向スペクトルから反射波をとらえることができたと考えられる。したがって、この現象は本観測期間特有のものであろう。

#### 4. 遮蔽された方向スペクトルの有する特性の数値的検討

##### 4.1 数値的検討方法

3. では、W~NW方向から新潟沖へ来襲する波エネルギーは佐渡島により遮蔽されることを示した。この遮蔽されたエネルギーは卓越した他の方向からのエネルギーに比べて無視できるほど小さい。そこで、新潟沖では、

沖合いの方向スペクトルから佐波島により遮蔽される方向のエネルギー成分を除去した方向スペクトルが観測されるものと仮定し、いくつかの数値的検討を行った。また、沖合いの来襲波の波向を変化させた場合に、新潟沖で得られるであろう波向統計量の変動特性についても数値的に検討した。

本報告では風波を対象とし、沖波の周波数スペクトルにJONSWAP型スペクトル<sup>10)</sup>を用い、光易型方向関数<sup>11, 12)</sup>を変形した式(1)を用いて、方向スペクトルを与えた。

$$\alpha(\theta|f) = \begin{cases} G_0 \cos^{2s} \left( \frac{\theta - \theta_0}{2} \right) & (\theta < \theta_1, \theta_2 \leq \theta) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、

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

$$S = \begin{cases} S_{max} (f/f_p)^5 & (f \geq f_p) \\ S_{max} (f/f_p)^{-25} & (f < f_p) \end{cases}$$

ここで、 $\theta_0$ 、 $S_{max}$ :それぞれ、光易型方向分布関数の主軸の方向と方向集中度の最大値、 $\Gamma(x)$ :Gamma関数、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ :それぞれ、遮蔽される方向の始点と終点を、 $N$ を $0^\circ$ とし時計回りを正として示している。

なお、解析に際しては、一般に用いられている平均波向 $\bar{\theta}$ 、主波向 $\theta_p$ 、平均分散角 $\theta_s$ および波峰長パラメータ $\gamma$ の4つのパラメータを波向統計量とし、波数空間上で表された方向スペクトルの $\theta_0$ 軸まわりの $n$ 次モーメント $M_n(\theta_0)$ とともに、沖波の波向の変動にともなう上記のパラメータの変動特性を検討した。これらの統計量の定義は式(2)~(6)に示すとおりである<sup>9, 13)</sup>

$$\text{平均波向} \quad \bar{\theta} = \tan^{-1} \left( \frac{M_{01}}{M_{10}} \right) \quad (2)$$

$$\text{主波向} \quad \theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2 M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (3)$$

$$\text{平均分散角} \quad \theta_s = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{M_{20} M_{02} - 2 M_{10} M_{01} M_{11} + M_{01}^2 M_{22}}}{M_{10} + M_{01}} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{波峰長パラメータ} \\ \gamma &= \left\{ \frac{(M_2)_{min}}{(M_2)_{max}} \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \frac{(M_{20} + M_{02}) - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2}}{(M_{20} + M_{02}) + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2}} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

$\theta$ 軸まわりの $n$ 次モーメント

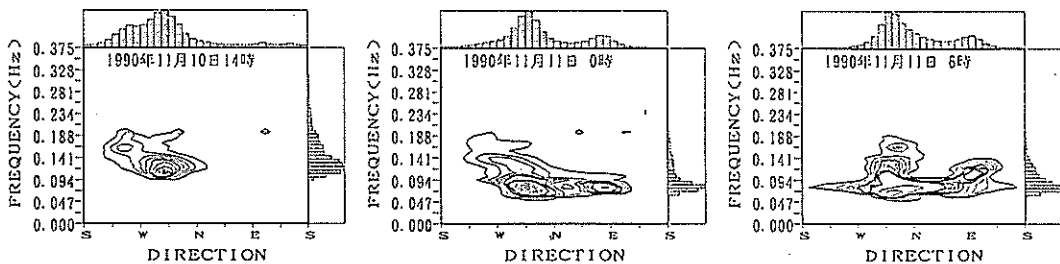
$$\begin{aligned} M_n(\theta) &= \int S(l) l^n d l \\ &= \iint S(l, m) (\cos \theta + m \sin \theta)^n d l d m \end{aligned} \quad (6)$$

また、 $M_{pq}$ は波数空間上で表された方向スペクトルの $(p, q)$ 次モーメントであり、

$$M_{pq}(\theta) = \iint S(l, m) l^p m^q d l d m$$

で表される。 $(l, m)$ は、波数空間上の座標系において波数および波向に対して

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



(1) 1990年11月10日14時

( $H_s=3.7\text{m}$ ,  $T_s=7.7\text{秒}$ )

(2) 1990年11月11日0時

( $H_s=5.2\text{m}$ ,  $T_s=11.5\text{秒}$ )

(3) 1990年11月11日6時

( $H_s=5.6\text{m}$ ,  $T_s=11.8\text{秒}$ )

図-8 方向スペクトル分布図 (1990年11月10日~11日)

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

の関係がある。

また、方向スペクトルの  $n$  次モーメントは相互の比較の便宜上、式(7)のように無次元化した値を用いて検討することとした。

$$\left. \begin{aligned} M'_0(\theta_0) &= \frac{M_0(\theta_0)}{M_{00}}, & M'_1(\theta_0) &= \frac{M_1(\theta_0)}{\sqrt{M_{00}M_{20}}} \\ M'_2(\theta_0) &= \frac{M_2(\theta_0)}{M_{20}}, & M'_3(\theta_0) &= M_3(\theta_0) \sqrt{\frac{M_{00}}{M_{20}^3}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $M_{00}$ 、 $M_{20}$ は、それぞれ遮蔽の影響がない場合の方向スペクトルの0次および2次モーメントである。

なお、実際には、佐渡島の両端で発生する回折波、佐渡島から波浪観測地点までの間の吹送距離で発生・発達する風波、および佐渡島と新潟海岸の地形特性から発生する局所風の影響等による波浪の影響を考慮する必要があるが、ここでは、回折効果のみ考慮することとした。ただし、回折効果は、波エネルギーの遮蔽による端部を平滑化することにより、回折と同様の効果を疑似的に導入している。ここで他の影響を無視したのは、ここではとくに遮蔽の影響のみを単純に検討するためである。

#### 4.2 方向スペクトル形状が波向統計量に与える影響

##### (1) $\theta_0$ 軸についての $n$ 次モーメントの変化特性

4.1で仮定した方向スペクトル形状が波向統計量におよぼす影響を検討するに先立って、まず、仮定した方向スペクトルのもつ基本的な特性を検討する。

方向スペクトルのもつ諸特性は  $n$  次モーメントを用いて定量化される。種々の波向統計量もこれら複数のモーメントの組み合わせにより定義されており、各モーメントの特性を明らかにすることにより、より意味の明確な量として用いることができる。ただし、各モーメントの値は基準となる軸の取り方によって異なるので、この点には注意が必要である。ここでは、沖合の波向を基準軸に選んでモーメントを計算し、遮蔽の影響を考慮した場合のモーメントの特性を検討することとした。すなわち、以下では遮蔽を考慮しない場合の光型型方向関数のピーク波向  $\theta_0$  を基準軸として検討した。これは沖合波浪の代表波向とみなされる値である。以後、とくに基準軸を明記しない場合には、 $n$  次モーメントは全て  $\theta_0$  方向の軸まわりの値を用いている。なお、基準軸の与え方を変えた場合のモーメント特性については、後で議論することとする。

図-9(1)、(2)は、式(1)で仮定した方向スペクトルを  $\theta_1 = 270^\circ$ 、 $\theta_2 = 315^\circ$  (遮蔽範囲: W~NW) の範囲で遮蔽し、有義波周期  $T_s$  をそれぞれ(1)12.0秒と(2)5.0秒とし、方向集中度  $S_{max}$  を変えた場合の、 $n$  次モーメント  $M'_n(\theta_0)$  の値を、 $\theta_0$  (沖合波浪の波向) を横軸にとって示したものである。図中の太線は  $S_{max} = 10$  の場合であり、以下、線が細くなるにつれて、方向集中度が25、100の場合を示している。図-9中のa.、b.、c. およびd.は、それぞれ、0、1、2および3次のモーメントの値である。また、図-9の(3)、(4)は、遮蔽される範囲を  $\theta_1 = 270^\circ$ 、 $\theta_2 = 360^\circ$  (遮蔽範囲: W~N) とした場合について、同様に示している。

図-9(1)~(4)のa.に示す0次モーメント  $M'_0(\theta_0)$  は方向スペクトルの有する全エネルギーの大きさを表す量で、これにより、遮蔽によるエネルギーの減少量が把握できる。図に示されるように、0次モーメントの値は沖合波浪が遮蔽の影響を受けると減少し、 $\theta_0$  が遮蔽域の中央部 ( $(\theta_1 + \theta_2)/2$ ) になるとき最小値を示す。最小値の値は  $S_{max}$  が大きいほど小さくなる。(3)、(4)の場合、すなわち、遮蔽領域がW~Nと広い場合には、 $S_{max} = 100$  に対するモーメントの最小値の値はほぼ0であり、背後にエネルギーがほとんど伝播しない。(1)、(2)の場合のように遮蔽領域がW~NWの場合にも、最小値は0.1程度であり、遮蔽領域の背後では波エネルギーは非常に小さい。これは、方向集中度が大きな方向スペクトルほど、波エネルギーがより狭い範囲に集中しているためである。

沖合の方向スペクトルのエネルギー分布は  $\theta_0$  にピークを有し、その両側の方向に滑らかに減少する。 $\theta_0$  が遮蔽領域の端部に一致するとき ( $\theta_0 = \theta_1$  または  $\theta_2$ ) には、エネルギー分布の片側半分が遮蔽され、遮蔽域では方向集中度が大きい方向スペクトルでは  $M'_0(\theta_0) \approx 0.5$  となる。一方、方向集中度があまり大きくない場合 ( $S_{max} = 10$ ) には、図にみられるように、遮蔽による波エネルギーの減少は  $\theta_0$  が遮蔽端部から  $90^\circ$  程度離れた方向であっても顕著に現れる。このように、 $\theta_0$  が遮蔽領域から離れた方向にある場合でも、方向集中度が小さな方向スペクトルほどエネルギー分布のすその部分が広く遮蔽されるため、モーメントの値は小さくなる。 $\theta_0$  が遮蔽域から十分離れている場合には、遮蔽の影響がほとんどあられず、 $M'_n(\theta_0) \approx 1.0$  である。ただし、新潟沖では遮蔽域から  $90^\circ$  以上離れた方向は陸地にあたるため、来襲する波はほとんどすべて遮蔽の影響を受けていると思われる。

1次モーメントは、各成分波のエネルギーの大きさと

基準軸まわりの波向の間隔によって決まる量である。したがって、波エネルギーの重心方向軸と基準軸のずれを判断する指標として用いることができる。式(1)で仮定したように、方向スペクトルはその一部分が欠損した分布をしているため、方向スペクトルの重心軸は一般に $\theta_0$ と一致しない。図-9(1)~(4)のb.は、a.と同じ条件下で、1次モーメント $M_1(\theta_0)$ の値を用いて、方向スペクトルの重心軸の偏心の程度を示したものである。ここで、方向角は時計まわりを正と定義したため、重心軸が $\theta_0$ から時計回りの半円にある時に、モーメントの正值となり、反対の半円にあるときには負値となる。遮

蔽域の中央部と $\theta_0$ の方向が一致する場合には、エネルギー分布が中心軸の両側に同じ範囲だけ遮蔽され、1次モーメントの値は0となる。 $\theta_0$ が遮蔽域の中央部より時計回り(W側)にある場合には正值をとり、反時計回り(N側)では負値となっている。遮蔽によるエネルギー欠損量とその波向の偏差 $|\theta - \theta_0|$ は、遮蔽域中央の方向に対して対称である。したがって、式(6)の定義より、1次モーメントは遮蔽域中央部の $M_1(\theta_0) = 0$ の点を中心として点対称となる。また、 $\theta_0$ が遮蔽域の端部あるいは端部よりわずかにずれた値で、1次モーメントの値はそれぞれ最大値と最小値を示す。

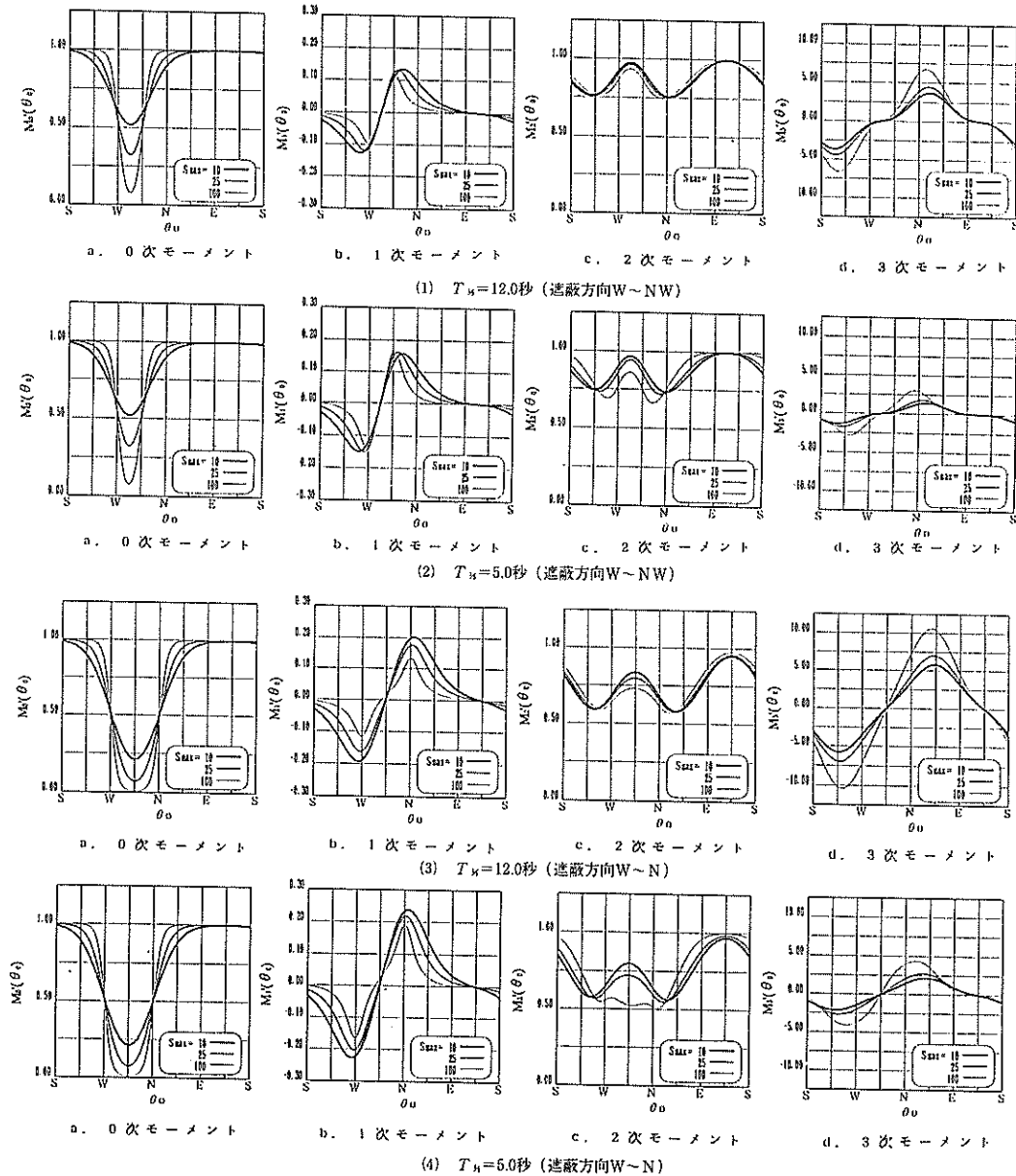


図-9 歪んだ方向スペクトル形状が高次のモーメントに与える影響

2次モーメントは基準軸まわりのエネルギーの広がり  
の程度を表す量であり、エネルギー分布の方向集中度  
を検討することができる。図-9(1)~(4)のc.に、それ  
ぞれの条件下の $M_2(\theta_0)$ の値を示す。2次モーメントは  
 $\theta_0$ が遮蔽域の外側から遮蔽域に近づくにつれて小さな  
値を示し、遮蔽域内では再び増加して $\theta_0 = (\theta_1 + \theta_2)$   
/2 でピークを示す。方向集中度の増大により、この  
ピーク値は小さくなる傾向がある。

3次モーメントは方向分布形状の非対称性を示す量で、  
これにより方向スペクトルの方向角に関する歪み度が検  
討できる。図-9(1)~(4)のd.に示す3次モーメント

$M_3(\theta_0)$ の特性は、1次モーメントの特性と類似してい  
る。しかしながら、3次モーメントの値は $\theta_0$ が遮蔽域を  
離れてもさらに大きくなり、遮蔽域中央部から $\pm 90^\circ$ 程  
度離れたところで最大値および最小値を示す。これは、  
3次モーメントでは、式(6)で遮蔽域と基準軸との方向  
角の差がモーメントの値を決定する上でより有効に働く  
ためである。なお、2次以下のモーメントの値は有義波  
周期の相違によりあまり明確な差異が認められない。こ  
れに対し、3次のモーメントでは有義波周期の違いによ  
る差異が顕著であり、有義波周期が大きく、方向集中度  
の大きな方向スペクトルほどモーメントの変動が大きく

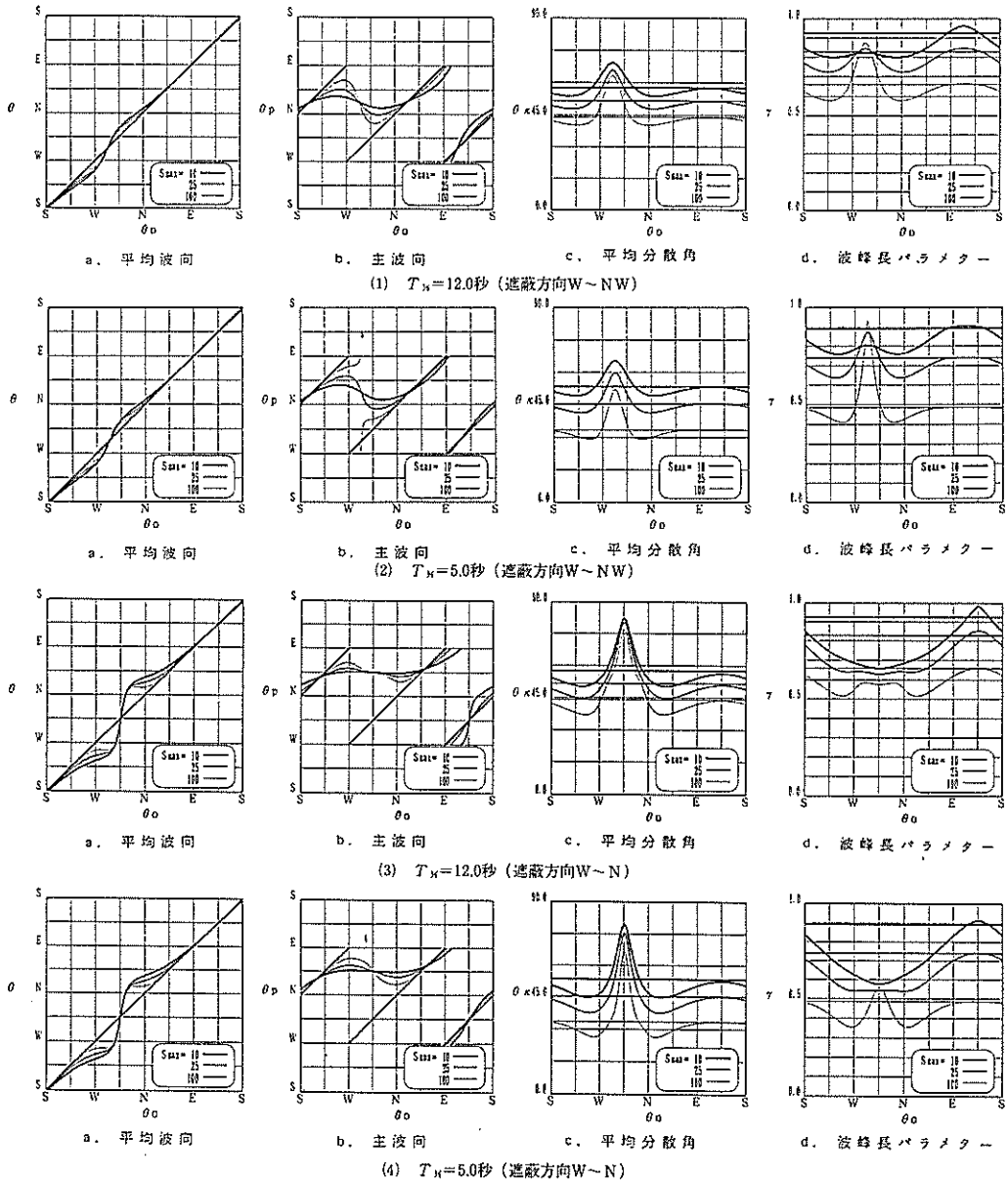


図-10 歪んだ方向スペクトル形状が波向統計量に与える影響 (平滑化なし)

なる。

(2) 方向スペクトル形状が波向統計量に与える影響

図-10は、式(1)の方向スペクトルを用い、 $\theta_0$ の方向を変化させた場合の各波向統計量の変化を示したものである。図-10のa, b, c, dの縦軸は、それぞれ平均波向 $\theta$ 、主波向 $\theta_p$ 、平均分散角 $\theta_s$ および波峰長パラメータ $\gamma$ で、横軸はいずれも $\theta_0$ を表している。なお、各図中の直線は、波エネルギーの遮蔽がない場合の各波向統計量の値を示したものである。

佐渡島から新潟沖までの距離は約50kmであり、新潟沖で観測される波浪は佐渡島の回折の影響を受けている

と考えられる。そこでここでは、式(1)で与えられる方向スペクトルに平滑化を導入することによって、擬似的に回折の影響を考慮することとする。この操作により、ピーク波向が遮蔽域端部から外側に移動し、方向集中度が小さな滑らかな方向分布形状となる。図-11は、図-10と同じ計算条件で、このような擬似的な回折を導入した結果である。

図-10, 11(1)~(4)のa, bは、図-9(1)~(4)と同じ条件下で、平均波向 $\theta$ の $\theta_0$ による変動特性を示している。いずれの図も $\theta_1 \leq \theta_0 \leq \theta_2$ の場合には、 $\theta$ は遮蔽がない場合に比べて、遮蔽域端部のより近接した方向にずれ

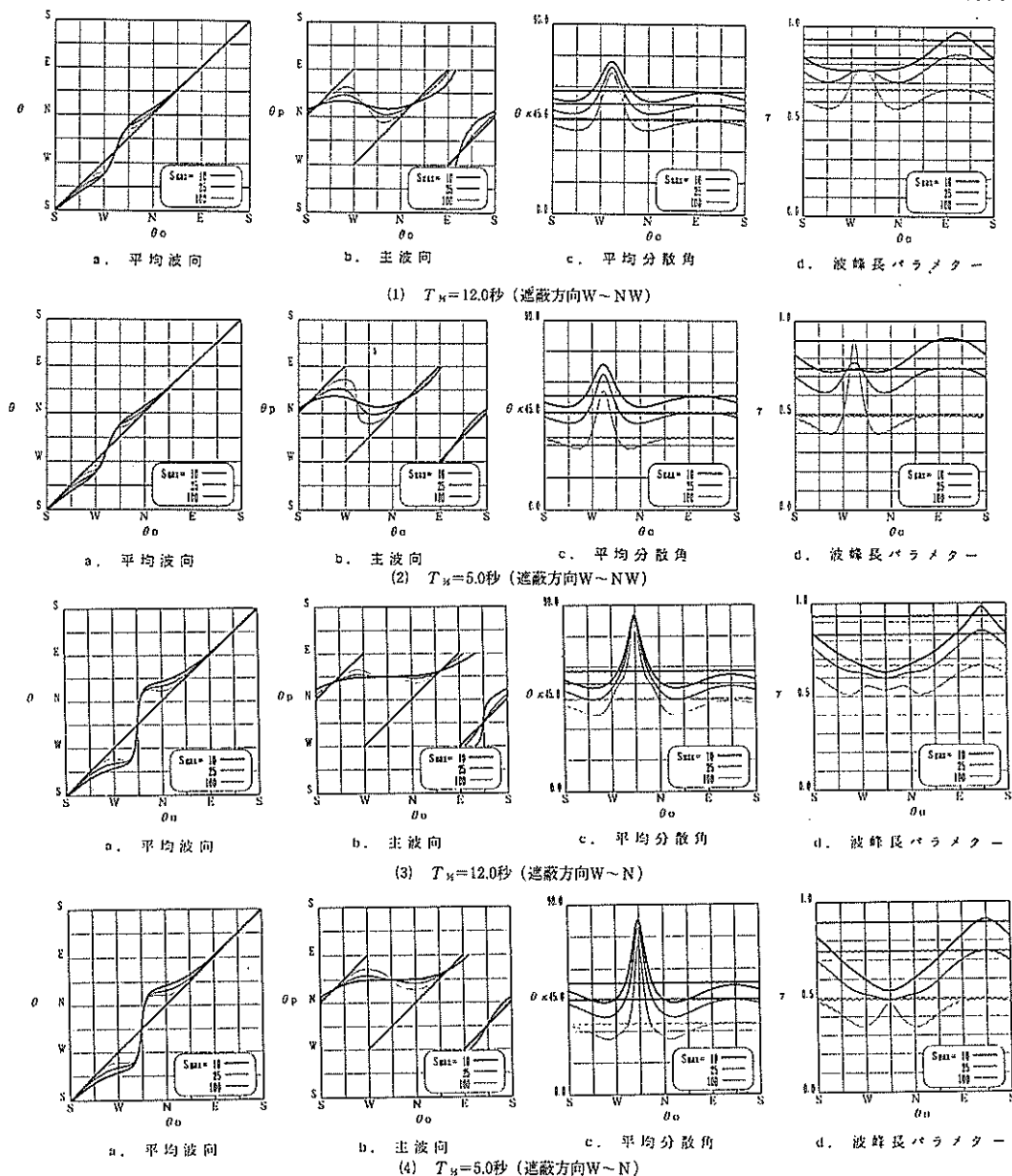


図-11 歪んだ方向スペクトル形状が波向統計量に与える影響 (平滑化あり)

る。また、 $\theta_0$ が遮蔽領域の中央付近となる場合 ( $\theta_0 \equiv (\theta_1 + \theta_2) / 2$ ) には、 $\bar{\theta}$ は $\theta_0$ と一致する。このため、この前後で平均波向の急な変化が認められる。とくに、 $S_{max} = 100$ と大きな場合には、遮蔽領域から $\theta_0$ が $20^\circ$ 程度外れると、 $\bar{\theta}$ が $\theta_0$ とほぼ一致するようになる。しかしながら、方向集中度が小さい場合には、 $\bar{\theta}$ が遮蔽領域から $45^\circ \sim 90^\circ$ 外側にある場合にも、 $\bar{\theta}$ と $\theta_0$ の間にずれがみられる。

数値的検討に用いた方向スペクトルは、 $\theta_0$ が遮蔽域にある場合、2つのピークに分裂した形状を示す。2つの分裂した分布は、それぞれ遮蔽域の端部からやや外側に離れたところで極大を示す。両分布のそれぞれの極大値の比を比較すると、 $\theta_0$ が遮蔽領域の端部の方向と一致する ( $\theta_0 = \theta_1$  または  $\theta_2$ ) 場合に、 $\theta_0$ と一致する分布の側で極大値の比が最大となる。また、 $\theta_0$ が遮蔽領域の中央にある場合には、両分布の極大値は等しくなる。異なる2つの分布が混在する場合には、 $\bar{\theta}$ はエネルギーの大きい分布の影響をより強く受けるため、 $\bar{\theta}$ は $\theta_0$ に近い遮蔽域端部周辺の値を示す。エネルギーの大きい分布が $\bar{\theta}$ に与える影響は、2つの極大値間の角度差が大きいほど強くなる。このため、遮蔽領域をW~Nと広くとった場合や、図-11のように平滑化を行った場合には、 $\bar{\theta}$ が遮蔽領域内にあるとき、 $\theta_0$ は $\theta_0 \equiv \theta_1$  または  $\theta_2$ に近い値を示す。

方向集中度の高い方向スペクトルで $\theta_0$ が遮蔽域の外側にある場合には、方向分布形状がすその部分で左右非対称となるが、すその部のエネルギー自体が小さいので、その影響は小さい。しかし、方向集中度が小さくなると、波エネルギーの方向分布形状がより平坦ななだらかな形状になり、すその部分のエネルギーが無視できない。このため、 $\theta_0$ が遮蔽領域の外側にある場合にも、方向スペクトルに遮蔽の影響が現れる。また、 $\theta_0$ が遮蔽域の内側にある場合には、方向集中度が小さな方向スペクトルでは、遮蔽域の両側に幅広く波エネルギーが分布する。このため、それぞれの分布の主たる波向は遮蔽域両端より外側にあるため、 $\bar{\theta}$ も遮蔽域両端より外側の値を示す。

図-10, 11(1)~(4)のb.は $\theta_0$ の特性を示したものである。図にみられるように、方向集中度が大きい場合には、遮蔽域の中央部付近で大きく変化し、 $\bar{\theta}$ の変化とは逆方向に $\theta_0$ が変化する。これは、遮蔽域の両端の方向角の差が $45^\circ$ であるのに対して、 $\theta_0$ は $\pm 90^\circ$ の範囲しか表示することができないために起こる不合理である。なお、方向集中度が小さな場合には、遮蔽域の中央部では $\theta_0$ の変化が緩やかである。

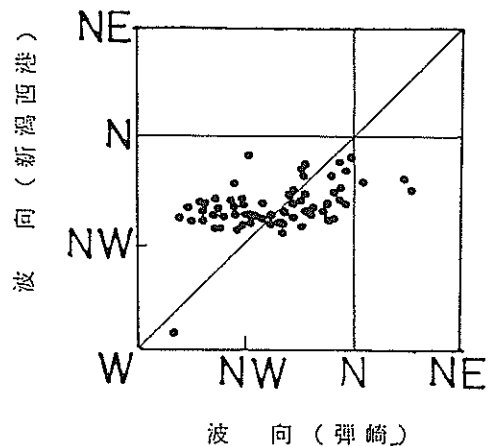
図-10, 11の(3)や(4)場合、遮蔽域が $90^\circ$ とさらに

大きいため、上記の影響が広範囲にわたって現れ、 $\theta_0$ がE~S方向である場合をのぞいてはNNE周辺の値しか示さなくなっている。なお、本報告の観測対象地点では、E~S方向は海岸線の方向であるため、実際には常時 $\theta_0$ はNNE周辺の方向を示すことになる。

中田ら<sup>9)</sup>は、弾崎(佐渡島)と新潟西港の波向の関係を、図-12を用いて検討している。ここで、弾崎波浪観測地点は佐渡島北東部沖合海域に位置するため、佐渡島による遮蔽の影響を受ける前の、いわゆる沖波に近い波浪を観測していると考えられる。

図の横軸は弾崎の波向を示し、縦軸は新潟西港の波向である。すなわち、図-10および図-11の $\bar{\theta}$ (または $\theta_0$ )が図-12の縦軸に対応し、 $\theta_0$ は横軸に対応する。本研究の観測対象期間は1979年1月1日~1980年12月31日の2年間で、両者の波向はミリ波レーダーを用いて観測されたものである。弾崎ではWNW~NNE方向の波向が観測され、新潟西港ではNNWの波向が多く、とくにNNW付近で両者の波向はほぼ一致している。これは、上記の数値的検討において、代表波向が遮蔽の影響によって、沖合の波向に関係なくほぼ一定の方向に示すことと定性的に一致する。ただし、中田らの用いた波向は両地点ともミリ波レーダーを用いた観測結果であるため、高周波数側の波の影響を強く受けていると思われる。したがって、佐渡島端部からの回折波や佐渡島背後の海域で発達した風波等の他の影響が強く現れて、波向がNNW寄りになっているとも考えられる。

ミリ波レーダーにより得られる波向は精度上の問題から方向集中度の小さな波をとらえることが難しく、一般に long-crested な波の波峰線の法線方向として波向が得られる。したがって、方向集中度の大きな方向スペ





クトルのピーク波向に相当するものと考えられる。すなわち、図-10と11(1), (2)の図で、方向集中度の大きな方向スペクトルの例が、図-12をよりよく再現すると思われる。図-10と図-11の(1), (2)のb.を比較すると、図-11の方が、波向がほぼ一定になる状態をよく再現している。これは、方向分布の平滑化によってピーク波向を遮蔽域の外側へ移動させたことにより波向はNNW寄りの値を示すため、観測値の再現性が向上したためと考えられる。

### (3) 方向集中度パラメータに与える影響

図-10, 11(1)~(4)のc.は、式(1)で定義された方向スペクトルの $\theta_0$ に対する $\theta_s$ の特性を示している。各図の条件は、a., b.の場合と同じである。図の縦軸は $\theta_s$ であり、横軸は $\theta_0$ を示している。図に示されているように、 $\theta_s$ は、 $\theta_0$ が遮蔽領域の両端付近にある場合に最小となり、遮蔽域の中央部とそれから $180^\circ$ 離れた位置にある場合に最大値をとる。 $\theta_s \doteq \theta_1$  または  $\theta_2$  のとき、波エネルギーは片側半分が遮蔽される。このとき、波エネルギーの方向分布形状が尖鋭となるため、方向集中度が増加する。これに対し、 $\theta_0$ が遮蔽領域の中央付近になるときは、入射波の極大値付近のエネルギーがカットされ、同程度の大きさのピークを2つ有する方向スペクトルが現れるため、方向集中度が減少すると考えられる。

図-10, 11(1)~(4)のd.は $\gamma$ を示したものであり、(1), (3)および(4)にみられるように、方向集中度 $S_{max}$ の値が小さい場合には、 $\theta_0$ が遮蔽領域の中央付近にあるとき、 $\gamma$ は最小値を示す。これは、 $\gamma$ は2方向系の方向スペクトルに対し、方向集中度の適切な指標ではないためと考えられる。一方、方向集中度が大きな場合には、方向分布形状が尖鋭となり極大値の小さな方のエネルギー分布が他方に比べて無視できるため、ほぼ1方向系の波浪とみなせることとなり、方向集中度は比較的大きい。

### (4) 基準軸の相違による高次のモーメントの特性

4.2(1)で、遮蔽により方向スペクトルの高次のモーメントが受ける影響について検討した。ここでは、遮蔽を受けない沖波の波向を基準軸としてモーメントの計算を行ったが、一般に沖波の波向は未知であり、実際には、遮蔽を受けた波の観測データから計算される代表波向で代用せざるをえない。そこでここでは、基準軸を変えた場合に方向スペクトルのモーメントがどのように変化するかを検討することとした。

図-13は、基準軸を遮蔽後のデータから算出される平均波向とした場合および主波向とした場合について、そ

れぞれの軸まわりの高次のモーメントを計算したものである。図の(1), (2)は基準軸を平均波向とした場合、(3), (4)は基準軸を主波向とした場合であり、それぞれのケースについて有義波周期を $T_s = 5.0$ および $12.0$ 秒として計算を行った。図中の太線は方向集中度 $S_{max} = 10$ の場合を示し、中線は25の場合、細線は100の場合である。遮蔽域の範囲は、その影響が顕著に現れるよう $W \sim N$ と広く設定した。ただし、0次モーメントの値は定義式より明らかなように基準軸の方向に依存しない。

平均波向は、その定義から方向スペクトルの重心軸の方向を示す。したがって、この軸まわりの1次モーメントは0となる。また、平均波向すなわち重心軸まわりの2次および3次のモーメントについては、それぞれ式(2)の関係をを用いて式(8)のように書き直せる。

$$\left. \begin{aligned} M_1(\bar{\theta}) &\equiv 0 \\ M_2(\bar{\theta}) &= \frac{M_{20}M_1^2 + 2M_{11}M_0M_2 + M_{02}M_1^2}{M_1^2 + M_0^2} \\ M_3(\bar{\theta}) &= \frac{M_{30}M_1^3 + 3M_{11}M_1^2M_0 + 3M_{12}M_2M_1 + M_{03}M_1^3}{(M_1^2 + M_0^2)^{3/2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

なお、各モーメントを図化する際の無次元化の方法は、式(7)と同様である。ただし、無次元化に用いるモーメントの値は同様に平均波向回りの値を用い、0次および2次のモーメントについては遮蔽の影響を考慮しない場合の値を用いて無次元化した。図-13(1), (2)にみられるように、平均波向に関する1次モーメントは、ほぼ0となっている。2次モーメントは、 $\theta_0$ が遮蔽域の中央部 $(\theta_1 + \theta_2)/2$ にあるとき極大を示し、遮蔽域の端部にある $(\theta_0 = \theta_1$  または  $\theta_2)$ とき極小を示す。式(1)より、一般に遮蔽の影響を受けた方向スペクトルは2山型のスペクトル形状を示す。2山型の方向スペクトルの場合、とくにピーク値が同程度の大きさであれば、平均波向は両者の中間の波向を示す。一方、両者間の比が大きい場合には、平均波向はより大きな方のピーク方向を示す傾向がある。また、 $\theta_0$ が遮蔽部中央付近にある場合は、同じ程度の大きさの2つの異なる方向エネルギー分布が存在するため、遮蔽がない場合に比べて0.8~0.9倍程度まで方向分散が大きくなる。一方、 $\theta_0$ が遮蔽部端部にある場合には、より大きなエネルギーピーク方向近傍を基準軸としてモーメントを計算することになり、波のエネルギーがこの軸近傍に集中しているため、

2次モーメントの値は小さくなる。

3次モーメントはエネルギー分布の非対称性の程度を表す。したがって、 $\theta_0$ が遮蔽部中央付近にあり、基準軸に対してほぼ対称にエネルギーが分布している場合には、モーメントの値は小さい。一方、 $\theta_0$ が遮蔽部端にある場合には、逆にモーメントの絶対値が大きくなる。

以上、2山型の方角スペクトルの場合、両ピーク間のエネルギーの比率によって、平均波向の回りの2次および3次のモーメントは興味深い特性を示すことが示された。すなわち、2山の内、一方のエネルギーが他方に比べて大きい場合には、2次モーメントが小さく現れ、方

向分散が小さくなったようにみえるが、3次モーメントは大きくなる。また、3次モーメントの符号は、大きなピーク方向からみた小さなピーク方向により決定される。これに対し、両ピークのエネルギーがほぼ同程度の場合、2次モーメントは遮蔽のない場合と同程度まで大きくなり、3次モーメントの絶対値は0に近い値を示す。これらの性質をさらに詳しく検討すれば、今後、2山型の方角スペクトルの特性を、高次のモーメントを用いて検討できるようになる。ただし、3次モーメントの値は、顕著なピークからある程度離れた方向に出現する微小なピークの影響によっても敏感に変化すると予想され

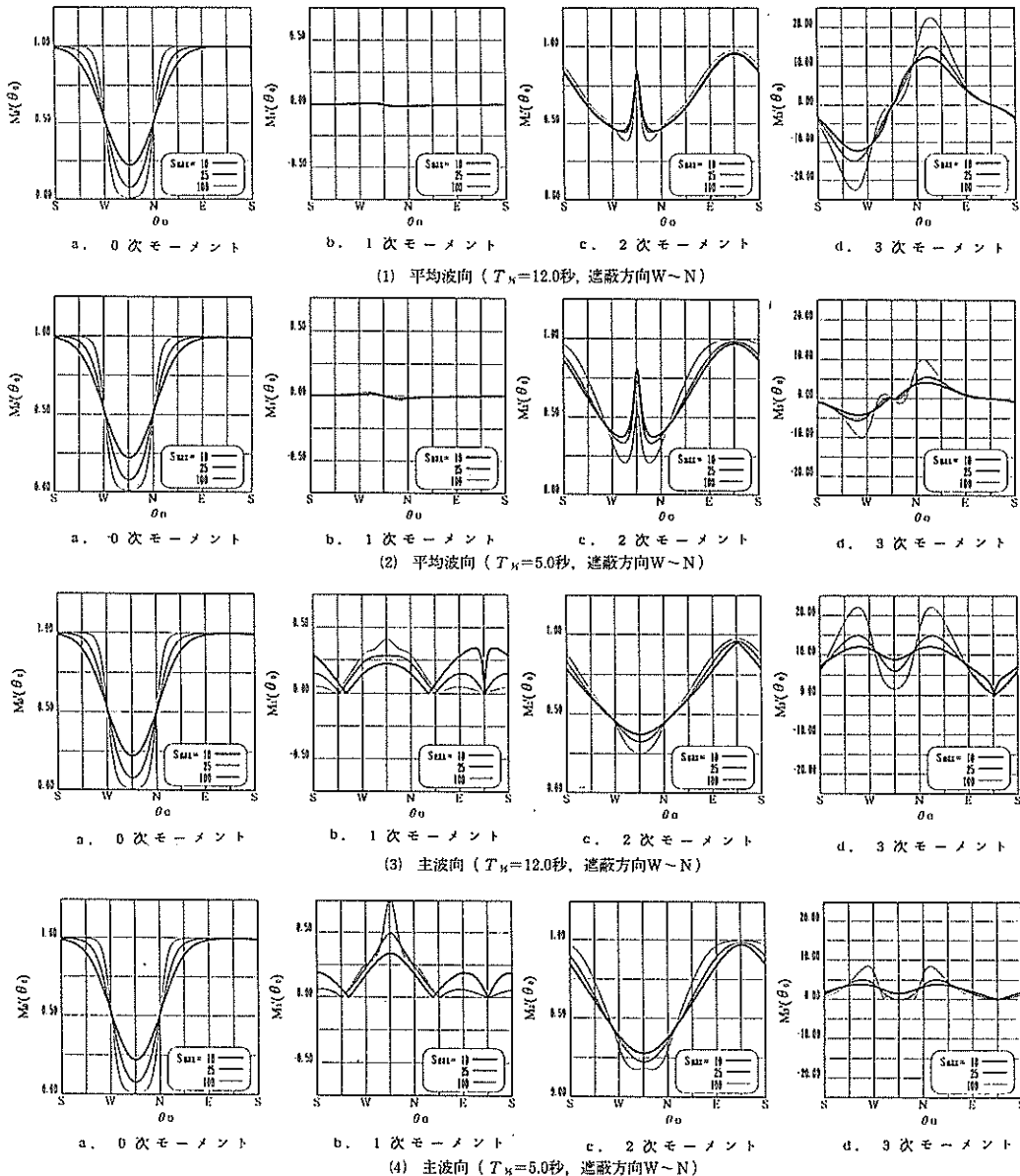


図-13 軸を与える方向による高次のモーメントの変化特性

るため、その取扱いには注意が必要である。

主波向まわりのモーメントは、式(3)から導かれる式(9)を用いて計算した。なお、モーメントの無次元化は平均波向まわりのモーメントの計算と同様である。

$$\left. \begin{aligned} M_1(\theta_p) &= \frac{M_{10} + M_{01} \tan \theta_p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_p}} \\ M_2(\theta_p) &= \frac{1}{2} (M_{20} + M_{02} + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2}) \\ M_3(\theta_p) &= \frac{M_{30} + 3 M_{21} \tan \theta_p + 3 M_{12} \tan^2 \theta_p + M_{03} \tan^3 \theta_p}{(1 + \tan^2 \theta_p)^{3/2}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、

$$\tan \theta_p = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + \tan^2 2\theta_0}}{\tan 2\theta_0}$$

$$= \frac{M_{20} + M_{02} \pm \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4 M_{11}^2}}{2 M_{11}}$$

主波向の定義は、2次モーメントを最小にする方向である。したがって、図-13(3)、(4)のc.は、遮蔽により歪んだ方向スペクトルの2次モーメントの最小値を示している。図のb., d.はそれぞれ1次および3次モーメントであり、それぞれ、分布の中心軸からのずれと分布の非対称性を表している。なお、主波向はその定義上波向きを±90°の範囲でしか表現できないため、1次および3次モーメントは絶対値で示している。図より、1次モーメントは、 $\theta_0$ が遮蔽部中央から180°反対の方向および±90°付近で0となり、遮蔽部の中央で極値を示す。一方、3次モーメントは $\theta_0$ が遮蔽部中央から180°反対の方向にあるときに0となり、遮蔽部中央で極値をとる。

#### 4.3 方向スペクトル形状が波向別波浪頻度分布に与える影響

##### (1) 遮蔽による波向別波浪頻度分布の変化

4.2では、方向スペクトルが地形によって遮蔽を受けた場合に波向統計量が示す諸特性や相違点について検討した。ここでは、4.2に示した特性によって生じる波浪特性量の方向別の頻度分布への影響について検討する。また、遮蔽される場合と遮蔽されない場合の頻度分布の相違についても検討する。

方向スペクトルの代表波向 $\theta_0$ が遮蔽によって $\theta$ になるとき、遮蔽前後で代表波向の出現確率は、 $P_0(\theta_0)$ からになるとする。このとき、遮蔽前の代表波向と遮蔽後の代表波向は1対1に対応すれば、両者の関係は連続的に変化するため、対応する2つの区間、 $(P_0(\theta_0),$

$P_0(\theta_0 + \Delta\theta_0)$ ) および  $(P(\theta), P(\theta + \Delta\theta))$  内での代表波向の出現確率は等しい。図-14は、両者の代表波向の出現確率の関係を概念的に示したものである。すなわち、両者の代表波向の出現確率は式(10)で表される。

$$\begin{aligned} P(\theta) d\theta &= P_0(\theta_0) d\theta_0 \\ \theta &= f(\theta_0) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、波向確率分布の変動特性を検討するために、確率分布の変換関数 $H(\theta)$ を、

$$P(\theta) = H(\theta) P_0(\theta_0) \quad (11)$$

として導入すると、式(10)より、変換関数は式(12)で表される。

$$H(\theta_0) = \frac{P(\theta_0)}{P_0(\theta_0)} = \frac{d(\theta_0)}{d\theta} = \frac{df^{-1}(\theta)}{d\theta} \quad (12)$$

ここに、 $\theta_0 = f^{-1}(\theta)$ は $\theta = f(\theta_0)$ の逆関数である。ただし、実際には $\theta_0$ と $\theta$ は多対1になる場合があるため、計算に際しては、次のような工夫を行っている。すなわち、 $\theta_0$ と $\theta$ が多対1の場合には、対応する全ての $\theta_0$ に対する変換関数の総和を用いて、 $\theta$ の変換関数の値を与えることとした。

また、主波向については、定義域が $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の範囲に限られている。そこで、比較の便宜上、この場合には、まず、 $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の範囲で変換関数を求めた後、それぞれの値を1/2にし、 $H(\theta + 180^\circ) = H(\theta)$ となるようにして区間 $180^\circ \leq \theta < 360^\circ$ に対する変換関

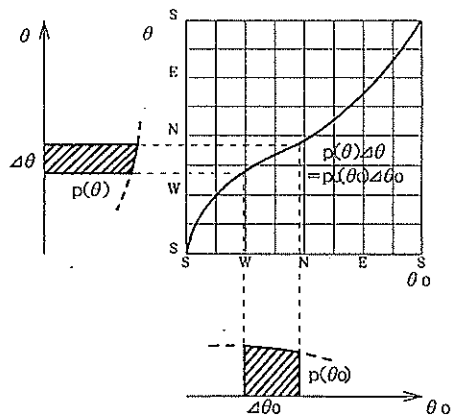


図-14 波向別波浪頻度分布の変化特性(概念図)

数の値を定めている。

## (2) 波向別波浪頻度分布の特性

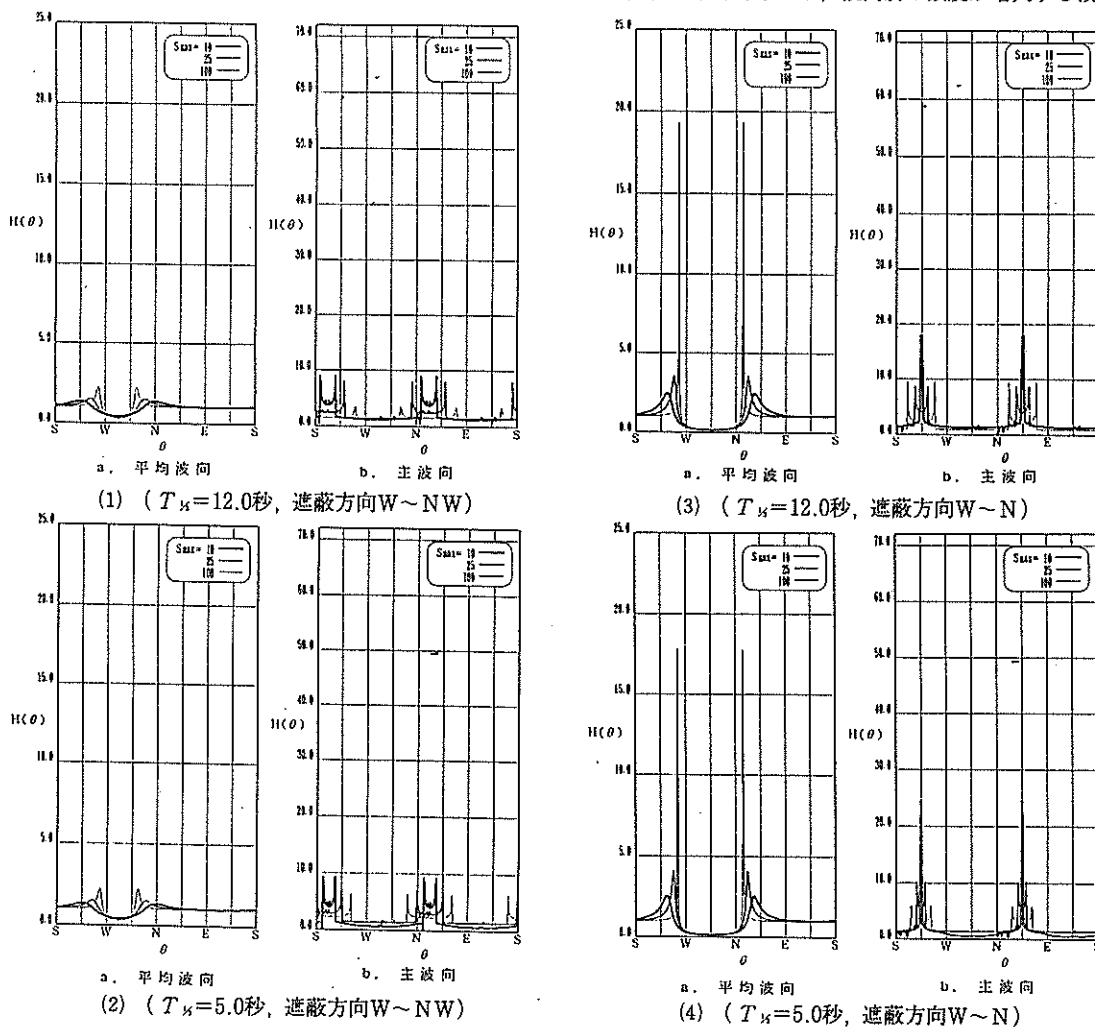
図一15(1)~(4)は、代表波向のとり方による波向別頻度分布の特性を示したものである。それぞれ、式(1)で定義した方向スペクトルをもとに、4. 2と同じ条件を用いて計算を行った。図のa., b.は、それぞれ代表波向として、平均波向と主波向を選択した場合の変換関数の特性を示している。

4. 3(1)で述べたように、遮蔽域通過前後で代表波向は多対1に対応し、代表波向の頻度分布はこれらの重ね合わせで与えられる。したがって、変換関数の値は沖合の代表波向の頻度分布によって変化することになる。そこで便宜的に、沖合の代表波向の頻度分布を一様分布と仮定した場合の遮蔽域内の代表波向の出現頻度分布を図一15に示す。これがここで述べる変換関数であり、以下で

はこれを変換関数と言わず、遮蔽後の頻度分布として検討を行うものとする。

なお、4. 2(2)で示したように、方向スペクトルに平滑化を行うと波向の変化をよりよく説明できる。そこで、図一16(1)~(4)に、方向スペクトルを平滑化した場合の代表波向の頻度分布を示し、図一15(1)~(4)と比較した。計算条件は、図一15のそれと同じである。

平均波向を代表波向にとった場合、図のa.に示されるように、 $\theta$ が遮蔽域外にある場合には、頻度分布の値はほぼ1.0で変化しない。遮蔽域内にある場合には、頻度分布は小さくなり、中央部 ( $\theta_1 + \theta_2$ )/2にある場合には最小値を示す。一方、遮蔽域端部 ( $\theta = \theta_1$  または  $\theta_2$ ) では出現頻度が大きくなる。方向集中度の大きな方向スペクトルでは最大値が8.0以上になる場合もある。逆に、方向集中度が小さな方向スペクトルの場合には、最大値は小さくなるが、波向別の頻度が增大する領域が



図一15 波向別波浪頻度分布の変化特性(平滑化なし)

遮蔽域近傍だけにとどまらず、広い範囲に分布する。また、最大値を与える $\theta$ も遮蔽域からやや外側にずれる。有義波周期の違いによる影響はあまり明確ではない。

4. 2(2)に示したように、平滑化した方向スペクトルの場合、 $\theta_0$ が遮蔽域内にある場合には、平均波向は遮蔽域端部でピークに近い方向( $\bar{\theta} \approx \theta_1$ または $\theta_2$ )を示した。これと同様に、図-16(1)~(4)では $\bar{\theta} \approx \theta_1$ または $\theta_2$ で頻度の値が非常に大きくなっている。方向集中度の大きな方向スペクトルでは、最大値が70.0~80.0になる場合もある。

主波向を代表波向にとった場合には、その定義上、波向を $0^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ の範囲でしか表示できない。このため、便宜的に頻度分布を $180^\circ$ ずらして重ね合わせた後、累積頻度の値が保存されるように絶対値を合わせて示している。したがって、見かけ上、E~S方向の側にも遮蔽の影響が現れている。

主波向は $\theta_0$ に対してあまり大きな変化を示さないのので、図-15, 16の両図において頻度の値が1.0以上となる範囲は非常に狭い。このため、出現頻度の高い範囲では出現頻度が非常に大きくなる。方向集中度の大きな方向スペクトルでは、遮蔽域端部( $\theta = \theta_1$ または $\theta_2$ )とそこから $\pm 90^\circ$ だけ離れた方向に頻度分布のピークがみられる。方向集中度が小さな場合には、ピークの方が遮蔽域から外側にずれるために、見かけ上 $180^\circ$ だけ離れた方向に現れるピークと重なり、遮蔽域の中央の方向から $\pm 90^\circ$ 離れたところに2つの大きなピークを示す。4. 2(2)で示したように、遮蔽の影響を受けた方向スペクトルに対しては主波向は妥当な方向を示さない。この影響は方向集中度が小さいほど顕著である。このため、主波向の出現頻度には2つの大きなピークがみられる。

図-17(1)は、図-12に対応する観測期間の弾崎と新潟西港の波向別の波浪頻度分布 $P_0(\theta_0)$ 、 $P(\theta)$ を計

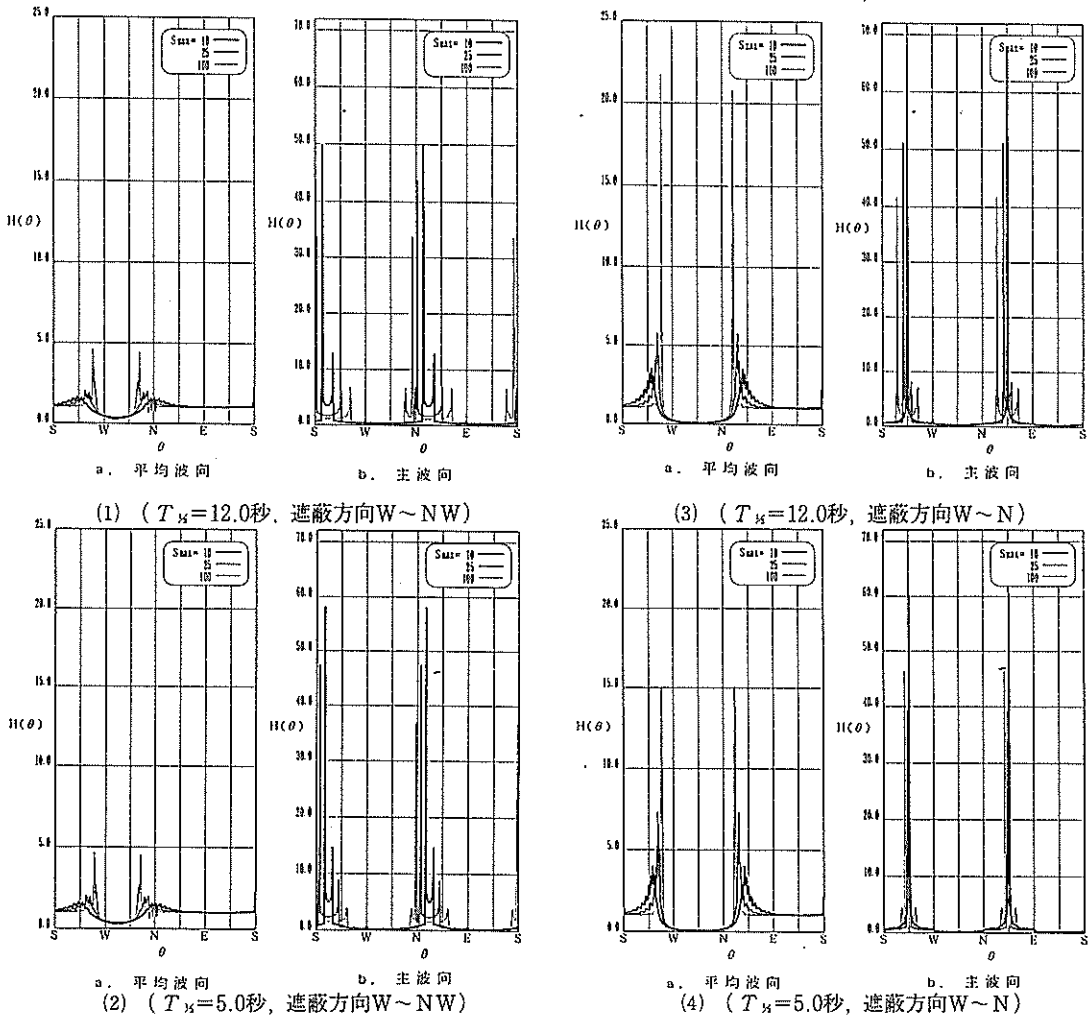
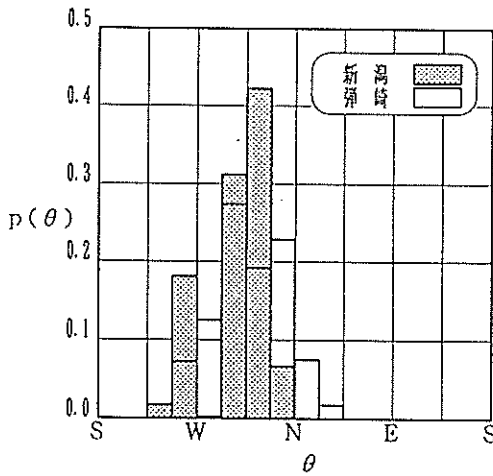
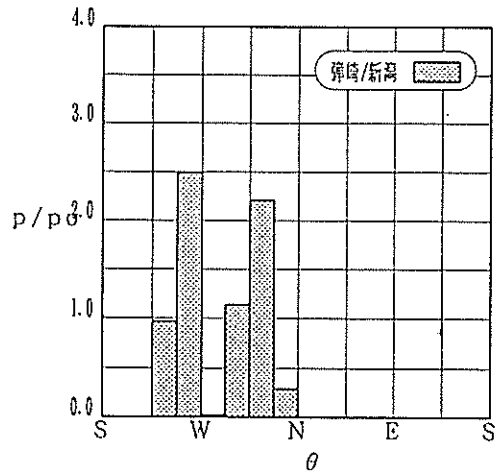


図-16 波向別波浪頻度分布の変化特性(平滑化あり)



(1) 波向別波浪頻度分布



(2) 頻度分布の変化特性

図一七 弾崎と新潟西港の波向別波浪頻度分布

算したものである。なお、このデータには種々の形状の方向スペクトルが含まれており、両者間の波向の関係を特定することができない。そこで、両者間の変換関数をそれぞれの波浪頻度分布の商  $P(\theta)/P(\theta_0)$  で定義して、図一七(2)に示した。これは、両者の波向の関係を  $\theta = f(\theta_0) = \theta_0$  とした場合に相当する。

図一七(1)より、弾崎ではSW～Eの範囲で波浪の出現がみられるが、新潟西港では佐渡島の両端の方向であるNとNWの狭い範囲に波向が集中していることがわかる。すなわち、図一七(2)と図一五および図一六を比較すれば、この特性は方向集中度の大きな方向スペクトルを対象として、平均波向について整理した結果と類似しているといえる。しかしながら、図一十二に示されたように、両者間の波向の関係は上記で仮定したものとは異なり、弾崎で遮蔽領内の波向が観測された場合には、新潟西港ではほぼNかNWの方向の波向を示す。したがって、この特性を考慮して両者の波向の変化特性を再整理すれば、図一五(1)や図一六(1)でみられる遮蔽域の両端部での頻度分布の集中をよりよく表現できるであろう。

## 5. おわりに

海洋波の方向スペクトルの形状は主として気象条件により支配されるが、波浪の伝播の過程で地形条件等の影響により変形を受けて沿岸域に到達する。本資料では、佐渡島の遮蔽効果を対象として、波向統計量におよぼす地形の効果を検討した。

本研究により得られた主要な結論は以下に示すとおりである。

(1) 新潟沖で観測される海洋波の方向スペクトルは、佐

渡島の遮蔽を受けて、エネルギーの方向分布がW～N方向で小さくなる。このため、遮蔽を受けた方向スペクトルは、非対称な形状を示したり、2山型の分布形状を示すことがある。移動性の低気圧など、波向が短時間に大きく変動する気象擾乱の場合に、この傾向が顕著に認められる。

(2) 遮蔽域端部の方向から入射する波の出現頻度は大きい。一方、遮蔽の影響を直接受ける範囲からの波の出現頻度は小さくなる。また、遮蔽域内にあたる波向の波浪が観測される場合、有義波諸元の値が小さくなる傾向が認められる。とくに、有義波周期についてその影響が大きい。

(3) 佐渡島の弾崎で遮蔽域内にあたる波向の波浪が観測される場合、新潟で観測される波向は遮蔽域端部のうち弾崎の波向に近い方の端部の方向を示す。波向別の波浪出現頻度が遮蔽域の両端で大きくなるのはこのためである。

(4) 光易型方向関数から遮蔽領内の波エネルギーを取り除いたものを遮蔽を受けた後の方向スペクトル形状と仮定し、数値的検討を行った。この結果、遮蔽の影響を受ける前後で、波向や波向別の波浪頻度分布の特性を検討し、実際の観測結果と対比してその特性を検討した。

(5) 上記(4)の方向関数に対して平滑化を行った方が、数値的検討結果と観測結果との対応がよい。これは、新潟沖で観測される方向スペクトルは、佐渡島を通過後の伝播時の回折の効果が無視できないためである。

## 謝 辞

新潟沖における定常波浪観測は、運輸省港湾局・各港湾建設局・北海道開発局・沖総総合事務局および港湾技術研究所の相互協力の上で構築運営されているナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）の一環として行われているものである。日々の観測業務を担当されている新潟港工事事務所をはじめとする第一港湾建設局の関係諸機関の担当の皆様方のご努力に改めて感謝の意を表します。また、観測データの整理とりまとめにあたっては、(財)沿岸開発技術研究センターおよび(株)エコーのナウファス担当チームの方々のご助力をいただいたことを記し、重ねて謝意を表します。

## 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）—いわき沖の観測結果—、港湾技術研究所報告，第32巻，第2号，1993，pp.45～113.
- 2) 本間 仁・堀川清司・趙 栄輝：佐渡島の波に対するしゃへい効果，第13回海岸工学講演会講演集，1966，pp.42～49.
- 3) 中田邦夫・及川 研・中尾邦彦・高橋豊喜・榎原修治：佐渡島の遮蔽効果に関する現地観測，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp.179～183.
- 4) 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄：波浪推算法に基づく佐渡島のしゃへい効果の検討，愛媛大学工学部紀要，第10巻第4号，1985，pp.343～353.
- 5) 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 1992），港湾技術研究所資料，No.770，1994.3，301p.  
1970年から1991年までの波浪観測年報は，それぞれ港湾技術研究所資料，No.137,158,178,209,233,258,282,311,332,373,417,445,480,517,545,574,612,642,666,712,721,745を参照
- 6) 運輸省港湾局監修・(財)沿岸開発技術研究センター発行：全国港湾海洋波浪観測資料（NOWPHAS 1993）1994.8，861p.  
1991年版，1992年版の波浪観測資料も同様に(財)沿岸開発技術研究センターから刊行.
- 7) 永井紀彦・橋本典明・浅井 正・大野正人・杉浦淳：新潟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40巻，土木学会，1993，pp.151-155
- 8) 橋本典明：海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究，港湾技術研究所資料，No.722，1992.3，118p.
- 9) 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.
- 10) Hasselmann, K. et al.: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsche Hydr. Zeit, Reihe A (8°), 1973, No.12.
- 11) 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.
- 12) 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.230，1975，45p.
- 13) 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.



港湾技研資料 No. 783

1994. 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 あんざい

Published by Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1994) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。