

いわき沖で観測された方向スペクトルの出現特性

永井紀彦* ・ 橋本典明**・ 浅井 正***
菅原邦彦****・ 久高将信*****

1. はじめに

わが国沿岸の波浪特性を把握する目的で、運輸省港湾局とその関係機関は昭和45年から統一的技術基準に則した集中処理による沿岸波浪観測を継続的に実施している。これらは主として各港湾に襲来する波浪の特性を明らかにすることを目的としており、水深 $h = -20 \sim -50$ m の地点における波浪諸元の取得を行っている。しかしながら、これらの観測施設で取得された波浪諸元を解析する場合、その多くについて浅海変形等による影響を無視できないことから、港湾・海岸構造物等の設計に必要な沖波の本質的な特性の一つである多方向性を議論することが困難となっている。すなわち、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。したがって、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必要性が今後増大していくものと思われる。

このような背景をもとに、近年の観測技術の進歩にもなつて従来では困難であった深水域での波浪観測が可能になっており、実際にいくつかの地点で実施されるようになった。そこで、本論文では深水域に設置された観測施設の一つで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. いわき沖波浪観測システム

(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 54 km（北緯 $37^{\circ}17'49''$ 、東経 $141^{\circ}27'47''$ ）の水深 $h = -154$ 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。

(2) 方向スペクトルの解析方法

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にはベイズ型モデル (BDM) (橋本, 1987) を用いた。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 (合田, 1981) を用いている。

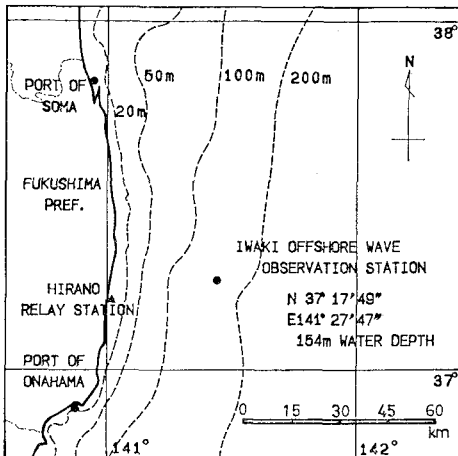


図-1 いわき沖の位置図

- | | |
|-----------|----------------------------|
| * 正会員 | 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室長 |
| ** 正会員 | 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 主任研究官 |
| *** 正会員 | 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室 |
| **** 正会員 | 運輸省港第二港湾建設局 横浜調査設計事務所調査課長 |
| ***** 正会員 | (株)エコー第一技術部 波浪プロジェクト室長 |

3. いわき沖の波浪特性

現地観測で得られた方向スペクトルを標準化するために種々の方向関数を用いられている。これらの関数はいずれも波エネルギーの来襲する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。

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集中度が増大し、比較的狭い範囲から方向集中度の大きい波浪が来襲する。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比較的良好に表現できる。しかしながら、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。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。

前述のように、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、BDMにより推定された方向スペクトルをそのまま用いることにより、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。

(1) 方向スペクトルの変動特性

図-2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-2から明らかにように、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。

なお、1989年~1990年の平均有義波高は平年値と比べて全国的にやや高めの傾向であった(小舟ら, 1991; 永井ら, 1992)。しかしながら、解析対象期間内のそれぞれの年の方向スペクトルの出現特性には明確な差異は見られない。したがって、解析対象期間は2年間と短いものの、この間の統計値は年間の方向スペクトルの出現特性を代表し得るものと考え、以下のような特徴を取りまとめた。

いわき沖では一般に冬季の終り~春季の始め(2月~4月)と夏季の終り~秋季(8月~11月)にかけて波高が大きく、夏季(5月~7月)には小さい。また、冬~春と夏~秋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-2中の4月にみられる両ピークのスペクトル密度の比は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

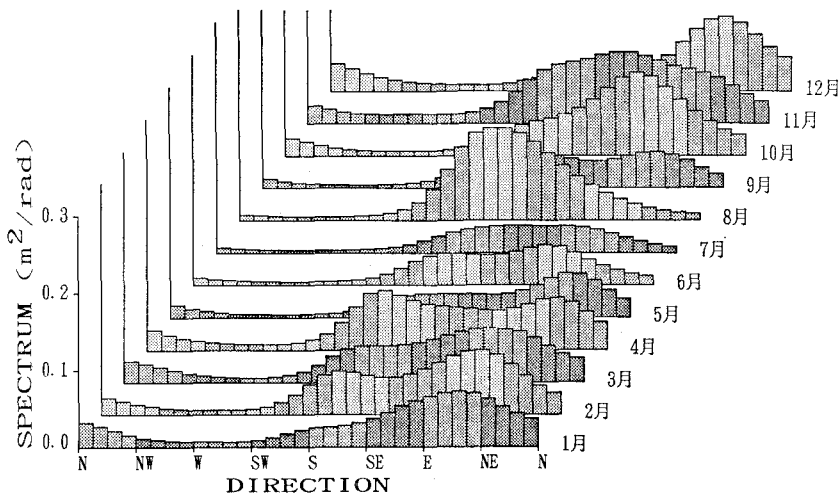


図-2 波エネルギーの方向分布の年間変動

い、これは、2つの分布を生起する気象擾乱の要因・経路などが最低でも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と考えられる。そこで、各々の波浪系を発生させる気象要因の観点から、ここで対象とした期間の気象要因をそれぞれ以下のように取りまとめた。

①冬季 (12～2月): ENE に比較的鋭いピークを有する分布形状を示すが、ESE, N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。この期間の主要な擾乱として1989年1月下旬には強い冬型気圧配置や南岸低気圧の通過があり、とくに1月には上記の傾向が顕著であった。その反面、1990年2月には平年と比べて、シベリア高気圧が弱く冬型気圧配置が長続きしなかったが、南岸低気圧の発生があったために比較的広範囲に及ぶスペクトル形状を示している。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ため、12月の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。

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とSに有し、なだらかな形状の方向分布を示す。

③夏季 (6～8月): 6・7月は非常に静穏に近いのに対し、8月だけが異常に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、ピークの方はESE方向を中心としている。

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ことによ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

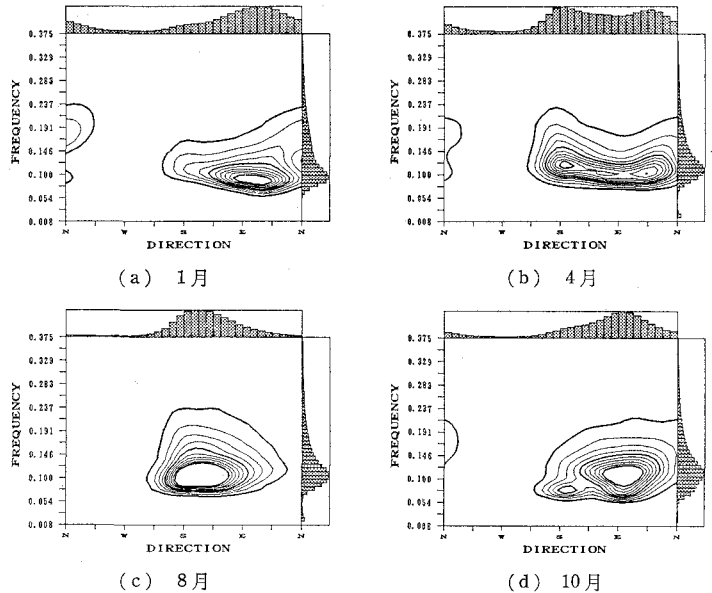


図-3 方向スペクトルの月別平均値の例

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。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平均した分布となり、波向方向にかなりなだらかな分布となっている。

図-3 (a)～(d) は、それぞれ1月、4月、8月および10月の方向スペクトルの月平均値を示したものである。それぞれ冬季、春季、夏季および秋季の代表例として示している。いずれの場合も主となる方向は図-2の場合と一致しているが、それぞれのピークに対応する方向スペクトルの特性は同じではない。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い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、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。これは、図-1に示されるようにいわき沖ではN方向に対し、比較的フェッチが短いためと考えられる。1月の方向スペクトル形状は他の

場合と比べて比較的鋭いピークを有するが、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的ものであるためと考えられる。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。台風時の波浪は風波とS方向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機会が多くなり、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。

以上から明らかなように、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。

(2) 深海波と沿岸域の波浪諸元の比較

図-4は、いわき沖とその沿岸域にある小名浜水深 $h=-20\text{m}$ 地点(以後、小名浜と呼ぶ)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-4に示すように、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。表-1は、各係数の値を示しており、 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、3.(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方向からの波高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と幅広い方向に波高が分布しており、このことから、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。

(3) 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 θ_{pi} と定義している。

図-5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-5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-6(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

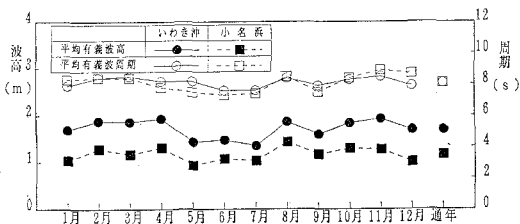


図-4 月別平均有義波

表-1 有義波高の相関関係

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

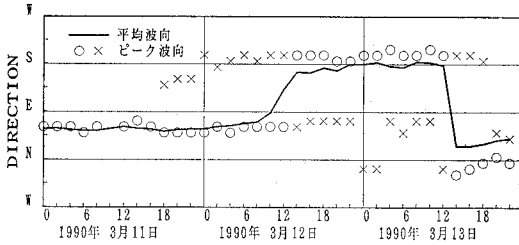


図-5 代表波向諸元の経時変化

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-6 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-6 に見られるように、1990年3月12日6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 (1981) は数値シミュレーションによる検討結果から、2方向波浪系の方角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。

5. おわりに

外洋の方向スペクトルの出現特性はわれわれの認識している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がある。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。

最後に、いわき沖および小名浜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。

参考文献

- 合田良美 (1981): 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.
- 小舟浩治・亀山 豊・永井紀彦・菅原一晃・橋本典明 (1991): 沿岸波浪観測年報 (1989), 港湾技術研究所資料, No. 712.
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正・平野隆幸 (1992): 沿岸波浪観測年報 (1990), 港湾技術研究所資料, No. 721.
- 橋本典明 (1987): 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, pp. 97-125.

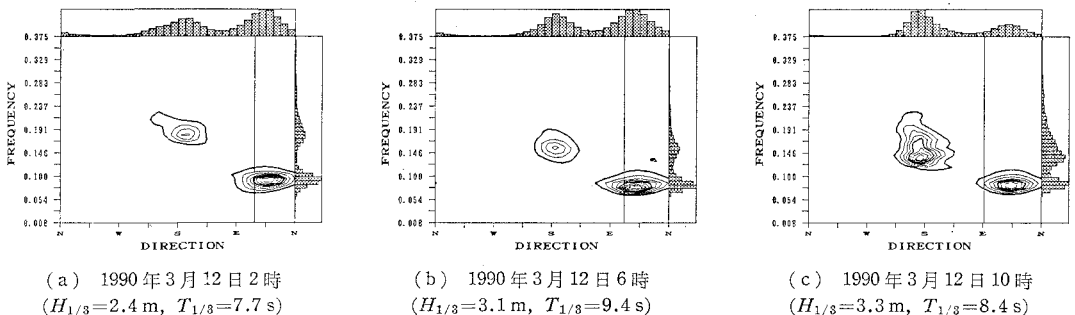


図-6 2方向系波浪時の平均波向の関係