

多峰型方向スペクトルの発生特性と そのときの気象配置

高山 知司¹・高橋 英紀²・北野 正夫³・永井 紀彦⁴

¹ フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

² 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所 地盤改良研究室 (〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³ 正会員 工修 (株) 関西電力 御坊第二火力建設所 次長 (〒 644-0023 御坊市名田町野島字西畑 3650)

⁴ 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 海象情報研究室 室長 (〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

広く外洋に面した港湾では、多峰型方向スペクトルが予想以上に多く現れることが明らかになっている。多峰型方向スペクトル波を単峰型として扱うと、港内静穏度などの解析結果に大きな誤差を含む可能性がある。本研究では、御前崎と御坊、高知沖における1年間の波浪観測データを用いて、多峰型を含む方向スペクトルの出現特性を調べるとともに、多峰型方向スペクトル波が出現する原因を明らかにするために、気象配置と波浪の関係についても調べている。その結果、太平洋側で観測される多峰型方向スペクトル波は、周期の長いS波(南方向からの波浪)と短いS波や観測点付近で発達した風波が周辺の地形の影響を受けることによって出現することがわかった。

Key Words : *directional random waves, multi-peaked directional spectrum, EMEP, meteorological condition*

1. はじめに

広く外洋に面した港湾では、うねりと風波が異なった方向から同時に来襲することが少なくない。このような波に関して方向スペクトルを算出すると、2つ以上のピークをもつ多峰型方向スペクトルとなる。この種の波は予想以上に現地で多く現れることが明らかになってきている¹⁾。しかしながら、このような多峰型方向スペクトル波であっても、単一の代表波で表されているのが現状である。単峰型方向スペクトル波として解析しているものを例に挙げると、港内静穏度や港湾・海岸構造物の施工計画、船舶係留条件の設定などがある。このような解析において、全ての波を単峰型として取り扱うと解析結果に大きな誤差を含む可能性が高い。

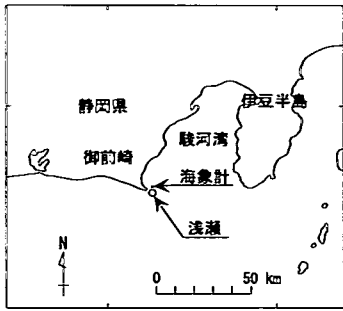
そこで本研究では、東海道から四国にかけての太平洋側での波浪の特性を明らかにするために、静岡県御前崎沖と和歌山県御坊沖、高知県高知沖で観測された1年間の波浪データを用いて、実海域における波浪の出現特性を調べた。波浪の諸元を求めるに当たって、方向スペクトル中の各ピークに対応した代表波をあてはめて、多峰型の特性が考慮できるようにした。この手法によって、多峰型方向スペクトル波を含めた波浪の解

析を行った。

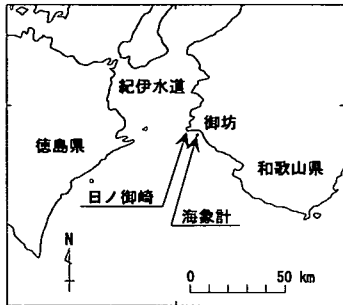
次に、天気予報などから多峰型方向スペクトル波を含めた波浪を予測するために、多峰型を考慮し、各地点における方向スペクトルと気象配置との関係を明らかにした。また、御前崎や御坊、高知などの既存の観測点以外においても、その地点付近の気象配置から、来襲する波浪の分布を推定することを可能にしている。

2. 解析に用いた波浪資料

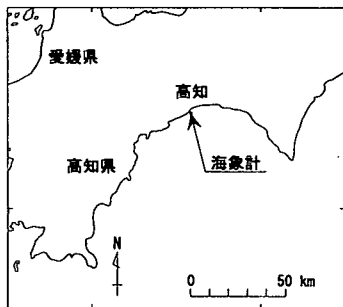
本研究で使用したデータは、御前崎と御坊、高知沖で観測されたものである。3地点ともに1998年9月～1999年8月の1年間のものを用いた。観測データは海象計による3方向水粒子速度と水位変動であり、これから拡張最大エントロピー法(EMEP)を用いて方向スペクトルを推定した。EMEP法による方向スペクトルの推定精度はEMLMなどの既往の方法と比べて極めて高く、多方向に複数のピークを有する方向スペクトルを区別することが可能である²⁾。方向スペクトルは4時間毎に求めて、各地点において約2100個を使用した。御前崎と御坊、高知沖の波浪観測には、1年間でそれぞれ14, 159, 136個の欠測があった。



(a) 御前崎沖



(b) 御坊沖



(c) 高知沖

図-1 波浪観測の位置

静岡県御前崎沖の波浪データは岸から約2.5kmの地点に設置された海象計によって得られており、その設置水深は約-23mである。図-1(a)にその概略位置を示している。海象計とは、海底に設置した超音波送受波器から異なる3方向に超音波を放射し、そのドップラーシフトから水粒子速度を測定するとともに、鉛直上方の海面の水位変動を測定する装置である³⁾。図-2に御前崎付近の水深図を示しているが、観測地点の南には浅瀬があり、外洋から来襲する波浪は碎波したり、大きく屈折されると考えられる。

和歌山県御坊火力発電所から南西沖約2kmの地点で(株)関西電力が波浪を観測している。図-1(b)に観測地点の概略位置を示している。観測機器は御前崎沖と同様に海象計で、その設置水深は約-36mである。観測

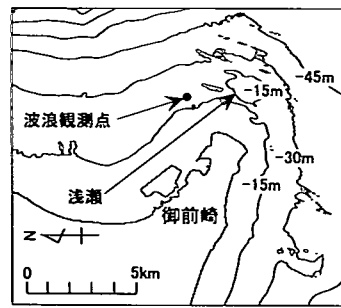


図-2 御前崎付近の水深図

地点の北側には日ノ御崎が存在し、これによって紀伊水道で発達する北からの波は遮蔽される。

高知県高知沖の海象計は、岸から約1.7km離れた水深約-25mの地点に設置されている。観測地点の概略位置を図-1(c)に示している。土佐湾のW~N~E方向は陸に囲まれており、高知沖の観測地点はSE~SSWの方向にだけ外洋に開けている。したがって、大きな波浪は主にS方向から来襲するものと考えられる。

3. 多峰型方向スペクトルと波浪諸元

波浪の方向スペクトルにおいて、スペクトルのピークが1つだけ存在するものを単峰型方向スペクトル、2つ以上のピークを持つものを多峰型方向スペクトルと呼ぶことにする。方向スペクトルが多峰型の場合は、スペクトルピークに対応して異なる周期と波向の波群が重なったものであるため、各波群毎に波浪諸元を求め波浪の特性を調べた。しかし、多数の方向スペクトルに関して、単峰型か多峰型かを判断し、波浪の諸元を求めるためには、判定基準を決め計算機によって高速に処理することが必要になってくる。

双峰型の方向スペクトルを分割する方法として、方向スペクトル中の2つのピークの間地点の周波数で長周期側と短周期側に分け、それぞれに対して代表波をあてはめることが考えられる¹⁾。しかしながら、この方法では方向スペクトルを2分することしかできず、3つ以上のピークが生じている方向スペクトルでは3つ目以降を無視することになる。また、長周期側と短周期側の波群を周波数で分割するため、同一周期付近で多方向の2つ以上の波が来襲するとき各ピーク毎に分割することができない。そこで、以下に示すような方法で多峰型方向スペクトルを分割し、波浪諸元を算定する方法を採用した。

1) Bretschneider・光易型の周波数スペクトルに光易型方向関数を掛け合わせたものを、波の方向スペクトルと仮定する⁴⁾。この方向スペクトルでは、有義波

高 30 cm, 有義波周期 5.0s, 方向集中度パラメータ $S_{max} = 10$ としたときの方向スペクトルのピーク強度は $0.0383 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ となる. 30 cm 以下の波が全体に与える影響は小さいので, 30cm より大きい波群を含まない場合を静穏とし, スペクトルピーク強度が $0.0383 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 以下のものは切り捨てた. また, 30 cm 以下の波を無視することによって, スペクトル分解能などに依存する本来無視すべき小さな波群を切り捨てることができる.

- 2) スペクトルピークを含むエネルギーレベルが $0.0383 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 以上の範囲で積分し, 有義波高と平均周期, 平均波向を求め波群を代表させた. 各ピークに対して 1 つの波浪をあてはめるため, 3 つ以上のピークを持つ多峰型方向スペクトルについても解析が可能である.
- 3) 2 つのピークが近い場合, 2 つの谷のスペクトル強度が低い方のピークの 0.3 倍以下ならば 2 つは異なる波群と考えた. 逆に, 低い方のピークの高さの 0.3 倍以上ならば同じ波群とした. 異なる波群と判定した場合は以下のように分割した. 2 つのスペクトルピークを通る直線上で最もエネルギー強度が小さい点を谷の基点とする. この基点を通り 2 つのピークを通る直線に垂直な線で 2 つのスペクトルピークを分割する. そして, それぞれに代表波をあてはめ諸元を求めた.
- 4) スペクトル強度が $0.0383 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ より小さいものを切り捨てるため, 各ピークの積分範囲はスペクトルピークの裾の部分を含まない. したがって, それぞれの波群の波高は小さめに算定される. これを補正するために, 積分して求めた波高を 1.15 倍し波群の有義波高とした. ただし, 波高が 50 cm 以下になるとスペクトルピーク値が小さくなるので, 切り捨てられる割合が大きく 1.15 倍しても実際の波高よりも小さくなり誤差が生じる. しかしながら 50cm 以上の大きな波と比べて, 50cm 以下の波が港内静穏度などに与える影響は小さいので, この誤差による影響は無視した.

4. 観測方向スペクトルの出現特性

(1) 各観測点での波浪出現特性

a) 御前崎沖波浪データ

方向スペクトル中の各ピークに対して, 1 つずつ代表波をあてはめ波浪諸元を求めた. 御前崎沖での波浪諸元の関係を図-3 に示す. スペクトル中の 1 つの波群が

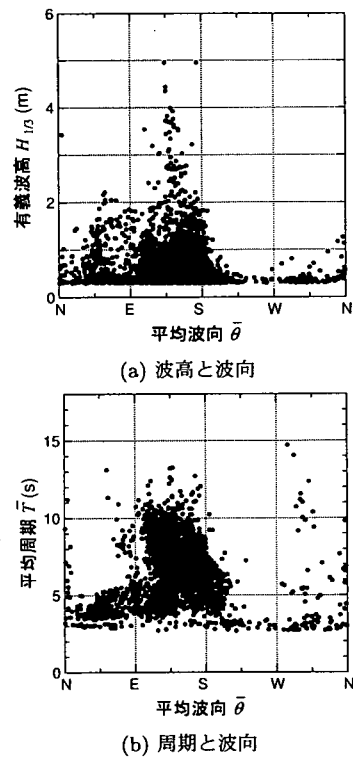


図-3 御前崎沖の波浪の出現特性

図中の黒点「・」1 つに対応している. (a) は有義波高 $H_{1/3}$ と平均波向 $\bar{\theta}$ の出現特性を示している. また (b) は, 平均周期 \bar{T} と平均波向 $\bar{\theta}$ の出現特性である. 平均波向をみると, 御前崎沖には N~SSW の方向から多くの波浪が来襲している. ただし, 図-3(a) から波高が 3m 以上のような大きな波は, 主に SE 方向から来襲することがわかる. SE 波の平均周期は 4~15s と短いものから比較的長いものまでである. つまり, SE 方向から風波やうねりが外洋から来襲していると推測できる. 一方, N~E 方向からの波の周期は 3~6s と SE 波に比べて短い. また, 観測点の東側約 40km に伊豆半島が存在し, N~E の方向は伊豆半島方向となる. これから, N~E 波は駿河湾内で発達した風波であると考えられる.

御前崎沖は太平洋に面しているので, 大きな波は外洋から S 波として多く来襲すると考えられる. しかしながら, 図-3(a) に示すように観測点において SE 波として大きな波浪が来襲してきている. このように波向が変化するの, 御前崎沖観測点の南側に存在する浅瀬のためだと考えられる. 浅瀬への進入方向の波は碎波し小さくなり, 浅瀬の背後での波向は進入方向以外から屈折してきた波に支配される. つまり, 波群の平均波向は屈折波の方向を向くようになるので, 外洋から御前崎沖観測点に来襲する波の向きは SE 方向に変わ

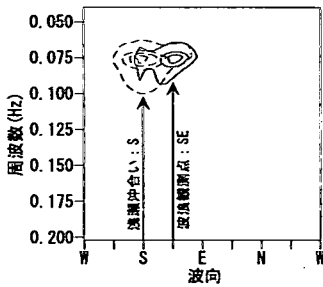


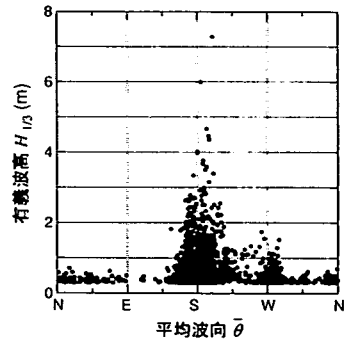
図-4 御前崎沖の浅瀬の影響

る。これを検証するために、SWAN モデルによって波浪推算を行った。SWAN モデルは、デルフト工科大学によって開発された第3世代波浪推算モデルである⁵⁾。SWAN では、周波数と方向、空間領域 (x, y) の4つの独立変数の関数である波作用量に関する式を解くことによって、流れの影響も考慮した波浪の変化を計算することができる。また、SWAN は深海域モデルとして信頼性の高い WAM Cycle3 や Cycle4 で用いられている物理過程を浅海域に適用できるように改良し、浅海域における底面摩擦や3波共鳴、碎波の影響を新たに加えたものである。

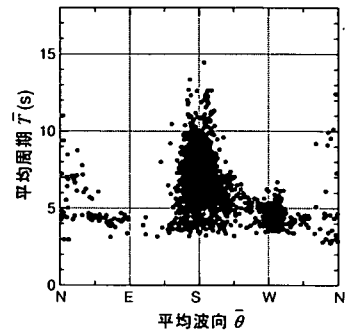
無風状態で計算領域の南側境界から有義波高 1.0m、平均周期 9s、平均波向 S の波浪を入射させた。波浪観測点での推算結果は波高は 0.72m、平均波向が SE となった。浅瀬沖合いでの方向スペクトルと波浪観測点での推算方向スペクトルを比較したものを図-4 に示している。この計算結果から碎波と屈折の影響で波向がほぼ SE に変わることが示された。

b) 御坊沖波浪データ

御坊沖で観測された全波群の代表波浪諸元の関係を図-5 に示す。(a) は有義波高と平均波向の出現特性である。また、(b) は平均周期と平均波向の出現特性である。図-5(a) から判断すると、御坊沖では SSE から WNW の波が来襲し、主に S と W 方向から比較的大きな波が来る。S 波の有義波高は 4m 以上にも達する場合がある。これに比べて W 波の波高はそれほど大きくない。平均周期については、図-5(b) から S 波は 3~13s と幅広く来襲することがわかる。これらから、S 波は外洋方向からの波と考えられる。これに対して W 波の周期は 3~6s と短い。観測点の W 方向には四国があり外洋に面していないことから、W 波が風波であることがわかる。観測点の WNW 方向には日ノ御崎がある。W 波は紀伊水道で発達した NW 方向の風波が日ノ御崎に遮蔽されて到達したものと考えられる。この遮蔽の影響については 5(1) で検証する。図-5(b) に示すように、N 方向からも 5s 以上の比較的周期の長い波が約 30 波群ほど来襲していることがわかる。観測点付近



(a) 波高と波向



(b) 周期と波向

図-5 御坊沖の波浪の出現特性

で N 波が発生したならば、平均周期は 3~4s 程度である。これから考えて、波高の大きな S 波が観測点北側にある煙樹ヶ浜付近で反射したものと考えられる。しかしながら、図-5(a) に示すように N 波の波高は小さく、S や W 波に比べて無視できる。

c) 高知沖波浪データ

高知沖で観測された全波群の有義波高と平均波向の関係を図-6 に示す。これから高知沖に来る大きな波は、ほぼ S 波であることがわかる。有義波高が 5m に達する波群も来襲している。S 波の周期は 4~13s であり、これは外洋で発達した風波やうねりである。E と W 方向には室戸岬や足摺岬などの陸があり、この方向から 30cm 以上の波浪はほとんど観測されていない。一方、N 方向からは 1m を超えるような波が来襲することがある。これは御坊沖と同様で、S 波による反射波だと考えられる。しかしながら、N 波は S 波に比べて小さく、また 1m を超えるような波の頻度も少ないので、N 波は以降の解析からは除外することにした。

高知沖観測点の SE~SSW の方向は外洋に開けており、外洋から来る波の向きは SE~SSW になると考えられる。しかしながら、図-6 に示すように波高が 3m 以上のような大きな波の向きは SSE~S である。これは遮蔽によるものと考えられる。つまり、観測点から足

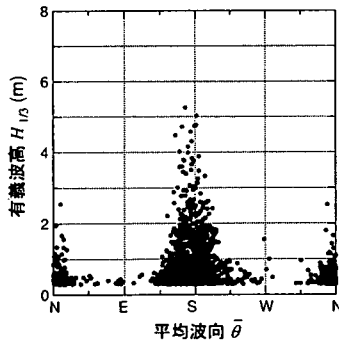


図-6 高知沖の波高と波向の出現特性

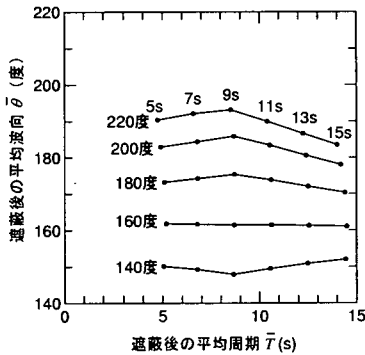
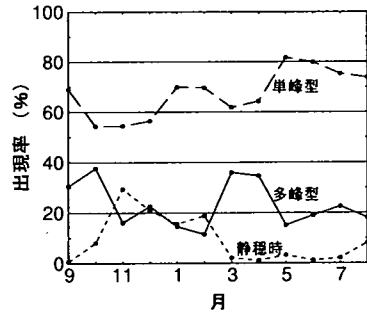
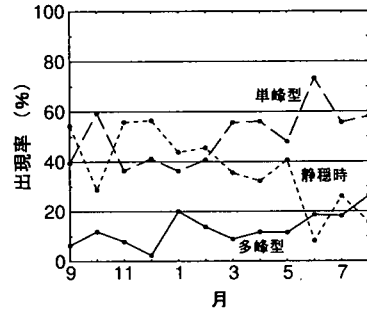


図-7 足摺岬と室戸岬の遮蔽の影響

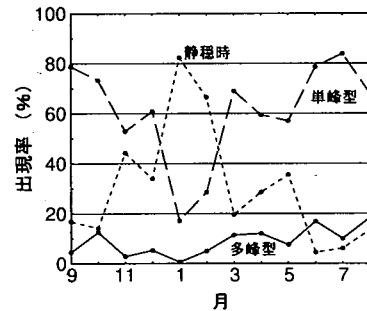
摺岬の方向はSSWであり、SW方向から来た波のW側のエネルギー成分は遮蔽され、平均波向としてはS方向に変わると考えられる。また同様に、観測点から室戸岬の方向はSEであり、SE方向から来た波のE側のエネルギー成分は遮蔽され、平均波向がS方向に変わると考えられる。SWANモデルによって検証してみた。高知沖を計算領域とし、その南側境界から30種類(=波向5種類×周期6種類)の波を入射させた。図-7に波向変形の計算結果を示している。波向の角度は、北側を0度とし時計回りに来襲してくる方向を示している。例えば、E波は90度で、S波は180度である。また図中の数字は、入射波の南側領域での平均波向と平均周期である。ただし、周期7s以下の波の方向関数は $\cos^4\theta$ 分布と仮定し、周期9s以上のものは $\cos^6\theta$ とした。この図から、周期5sで波向220度(SW波)の入射波は、遮蔽の影響で波向190度(S波)になることがわかる。また、周期が13~15sと長くなるにつれ平均波向の変化が大きくなる。これは遮蔽効果以外に、屈折の影響も入ってきているためだと考えられる。140度方向から入射する波(SE波)の波向は150度が変わる。SW波よりも波向の変化が小さい理由は、足摺岬の方向がSSWであるのに対して室戸岬はSE方向であり、遮蔽の影響が少ないためだと考えられる。他の波



(a) 御前崎沖



(b) 御坊沖



(c) 高知沖

図-8 方向スペクトルの月別出現率

についても約170度側に波向が変形することから、高知沖観測点に来襲する波は、遮蔽や屈折によってS方向に集中することがわかる。

(2) 各方向スペクトルの月別出現率

図-8は御前崎と御坊、高知沖における単峰型と多峰型方向スペクトルの月別出現率である。30cm以上の波群を含まない静穏なときの方向スペクトルの割合も併せて示している。ただし、欠測している方向スペクトルの割合は図から省略している。それぞれ、点線が静穏な方向スペクトル、破線が単峰型方向スペクトル、実線が多峰型方向スペクトルの割合である。

a) 静穏な方向スペクトルの割合

図-8(a)からわかるように1998年11月~1999年2月の間、御前崎沖では静穏時の割合が17%以上であり、

他の月に比べて海が穏やかである。御前崎沖で観測される主な波浪は、春と秋に通過する移動性の低気圧と台風によるNE～E波、および春～秋の外洋からのS波である。これに対して11～2月の冬季は、他の季節に比べて低気圧等の気象擾乱が連続的に来襲することが少なく、海は静穏な場合が多い。

図-8(b)の御坊沖においても11～2月は44～57%と御前崎と同様に穏やかなことがわかる。これに加えて、御坊沖では9,10月と3～5月においても静穏時が29～54%であり比較的多く含まれている。この時期、御前崎沖では低気圧が南側を通過すると駿河湾で北東の風が吹きNE波が発達し来襲する。これに対して御坊沖では、北西方向は陸でフェッチが短く波浪が発達しないためと考えられる。

同様の理由で、高知沖においても11～5月の冬から春にかけて、図-8(c)に示すように静穏時が20～82%含まれており9,10と6～8月に比べて多いことがわかる。さらに、高知沖では1,2月には静穏時の割合が66～82%と特に多く含まれていることがわかる。これは1,2月に北西の冬季風浪による波(NW波)の影響が小さいためだと考えられる。

b) 単峰型・多峰型方向スペクトルの割合

図-8(a)が示すように、御前崎沖において10～12月と3,4月の単峰型方向スペクトル波の出現率は、54～64%と他の月に比べて低い。これに対して、9,10,3,4月の多峰型方向スペクトルの出現率は30～38%と他の月より高い。この時期の御前崎沖での多峰型方向スペクトル波は、北東の風によって駿河湾で発達した風波、および外洋から来たうねりが重なって生じている場合が多い。駿河湾に比較的強い北東の風が吹くときは、御前崎の南西に温帯低気圧あるいは南～南西に台風が位置している。この位置については5(2)で詳しく述べる。1998年10月に駿河湾に北東の風を吹かせた低気圧と台風はそれぞれ7個と2個で、1999年3月にはそのような低気圧が11個であった。これらの個数は他の月と比べて非常に多く、他の月よりも9～10,3～4月に多峰型方向スペクトルが多く発生したと考えられる。

御坊沖における11～2月の冬季の単峰型方向スペクトル波は、図-8(b)に示すように36～41%と他の月に比べて少ない。これに対して、1,2月と6～8月に14～26%と多峰型方向スペクトルが多く発生している。1,2月の多峰型方向スペクトルは主にW波と外洋から来るSW波による多方向型のものである。1,2月の気圧配置は西高東低になることが多く、紀伊水道で北西の風が吹く。W波は、紀伊水道で発達したNW波が日ノ御崎で遮蔽され、波向を変えたものと考えられる。また、四国の徳島県南沖でNW波が発生し、そのエネルギーの

一部がSW波として御坊沖に来襲していると考えられる。したがって、御坊沖における1,2月の多峰型方向スペクトルは、西高東低の気圧配置によるものと考えられる。6～8月に多く出現する多峰型方向スペクトルについては以下で述べる。

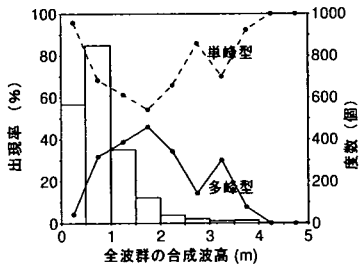
高知沖では、御前崎沖や御坊沖のように北東や北西の風の影響を受けない。したがって、図-8(c)に示すように11～5月にかけて多峰型の割合は10%以下と小さい。しかしながら、6～8月は10～19%と若干高い。図-8(a)と(b)から、御前崎沖と御坊沖においても6～8月の多峰型の割合は18～26%と比較的高いことがわかる。これは、南から来る周期の違う波群によって構成された多周期型の多峰型方向スペクトルである。3地点とも観測されていることから、この種類の多峰型方向スペクトル波は局所的なものではなく、東海道から四国・九州にかけての太平洋側のどの地点にも来襲するものだと考えられる。

(3) 各方向スペクトルの波高別出現率

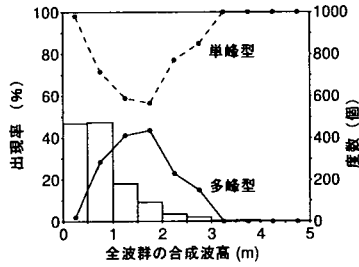
図-9は御前崎と御坊、高知沖における単峰型と多峰型方向スペクトルの波高別出現率である。ある多峰型方向スペクトルに含まれる全波群の代表波高に対して二乗和を求め、その平方根を多峰型方向スペクトルの合成波高とした。また、合成波高に対するスペクトルの出現度数分布も併せて示している。

図-9(a)に示す御前崎沖では、波高1～2mのときに多峰型方向スペクトルの出現率は39～46%であり比較的大きい。また、(b)の御坊沖では41～43%、(c)の高知沖では22～25%であり、同様に波高1～2mのときに多く多峰型が出現する。ただし、高知沖での出現率は22～25%であり御前崎と御坊沖に比べると小さい。これは前で述べたように、高知沖付近の地形の影響で多峰型方向スペクトルが発生しにくく、全体的に多峰型方向スペクトルが少ないためである。

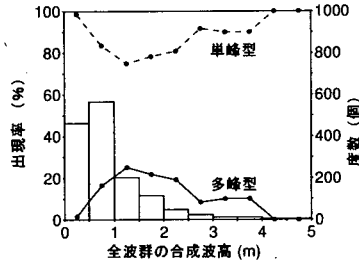
波高2m以上では、3地点ともに波高が大きくなるにつれて多峰型の出現率が小さくなっている。また逆に、波高1m以下では波高が小さいほど多峰型の出現率が小さい。波高2m以上で多峰型の出現率が小さくなるのは、ある波群の波高が大きくなると他の波群よりも突出し単峰型となるからである。多峰型方向スペクトルにおいて最も波高が大きい第1ピークと2番目に大きい第2ピークの波高比(H_1/H_2)の平均値を図-10に波高別に示している。波高1.5～2mのときのピークの平均波高比が3地点で3.03～3.65であるのに対して、波高3～3.5m(御坊は2.5～3m)では4.15以上と大きくなっている。これから、波高が大きくなると第1ピークが他のピークよりも突出しており、単峰型の割合が大きくなるのがわかる。



(a) 御前崎沖



(b) 御坊沖



(c) 高知沖

図-9 方向スペクトルの波高別出現率

波高1m以下において波高が小さいほど多峰型の出現率が小さくなるのは、第2ピークの波高が30cmよりも小さく、多峰型の判定基準によって第2ピークは切り捨てられ単峰型となるものが多いためだと考えられる。図-10に示すように、波高が1m以下における多峰型方向スペクトル中のピークの平均波高比は1.06~1.58である。波高1m以上で2.14以上であることから考えて、波高1m以下では波高比はかなり小さい。波高比の平均値が小さく1に近いのは、波高が小さく波高比が大きい多峰型方向スペクトルが第2ピークを切り捨てられて単峰型と判定しているためだと考えられる。したがって、波高が小さくなると多峰型の割合が減少する。

5. 多峰型方向スペクトル波と気象配置

(1) 西高東低の気圧配置と波浪

日本列島付近を通過する移動性の温帯低気圧の中に、シベリア方面で発生するものがある。この低気圧は12

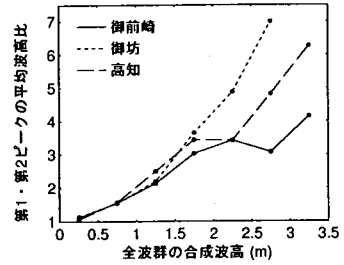


図-10 第1・第2ピークの平均波高比

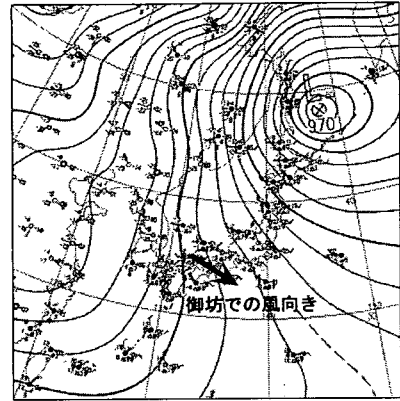


図-11 西高東低時の気圧配置 (1999/1/10 3:00)

~2月の冬季に多く発生する。低気圧が去った後、日本列島付近は西高東低の気圧配置になり北西の季節風が強く吹くことが多い。西高東低になったときの例として1999年1月10日3時の気圧配置を図-11に示す。また、3地点での1999年1月8~13日の波向の時系列を図-12に示す。図-12(a)~(c)の順に、御前崎沖、御坊沖、高知沖の時系列を示している。ただし、これらはスペクトル中の波高が大きい2つの波群の波向を示したものである。図中の「●」が方向スペクトル中の第1ピークで、「○」が第2ピークである。

図-12(a)からわかるように、気圧配置が西高東低の時には御前崎沖ではS~SSW波が来襲している。これは、4.で説明した南側の岩礁の影響を考慮すると、かなり西寄りになっている。これは御前崎沖の南西側の海域で発達した波浪の一部が来襲したためと考えられる。つまり、西高東低の気圧配置の場合、御前崎の南西の海域では等圧線が南北になり波向WNW~NWの風波が生じる。この波浪のエネルギーの一部が御前崎にS波として来襲したものと考えられる。これを検証するためにSWANモデルによって波浪推算を行った。風速10m/sの西北西の一樣風が吹いているとして、御前崎沖観測点での方向スペクトルを推算した。これは、冬に西高東低の気圧配置になったとき、西北西~北西の10m/s程度の風が吹くことを考慮したものである。こ

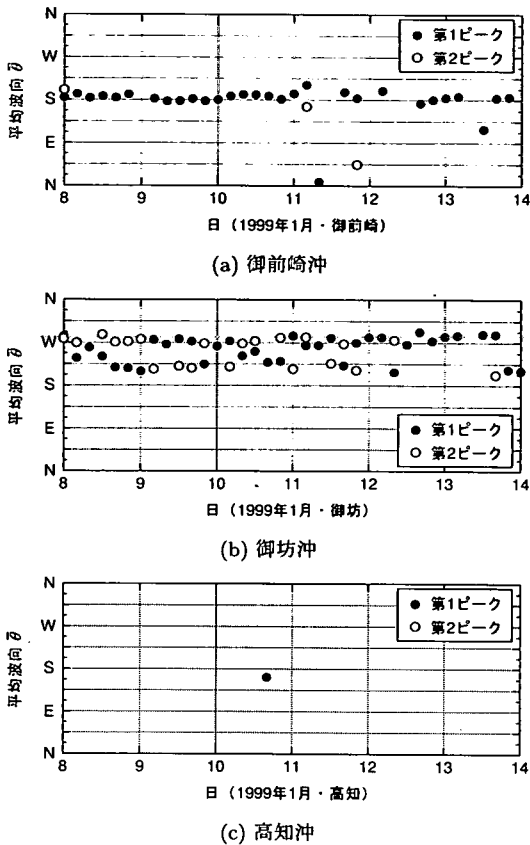


図-12 西高東低時の波向時系列

の推算結果を図-13に示している。これから西高東低の気圧配置のとき、御前崎沖にSSW波が来襲することがわかった。ただし、海上では約10m/sである風も御前崎付近の陸地ではこれより弱い。したがって、実際では図-13中のAで示したピークはこれよりも小さいと考えられる。

図-12(b)において、御坊沖では波向Wと波向SWの多峰型方向スペクトル波が観測されている。それぞれの平均周期は約3.5~5.5sと5.5~7.5sである。このW波は紀伊水道で発達した波浪であると考えられる。西高東低の気圧配置の時、紀伊水道で波向NWの風波が発生する。紀伊水道で波向NWであった波も日ノ御崎による遮蔽で、御坊沖ではW方向になったと考えられる。日ノ御崎の遮蔽の影響をSWANによって検証した。紀伊水道と御坊観測点付近に風速10m/sの北西の様な風が吹いているとして、紀伊水道と御坊観測点での方向スペクトルを推算した。計算した結果を図-14に示している。点線が紀伊水道での方向スペクトル、実線が御坊沖でのものである。これから、紀伊水道ではNW方向であった波も、日ノ御崎の遮蔽によってNW

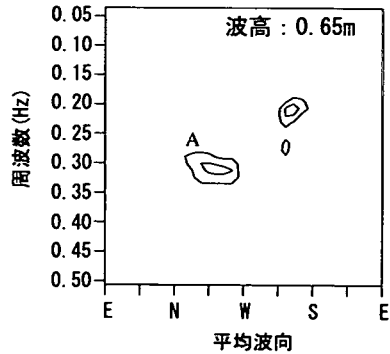


図-13 御前崎沖における西高東低時の波浪

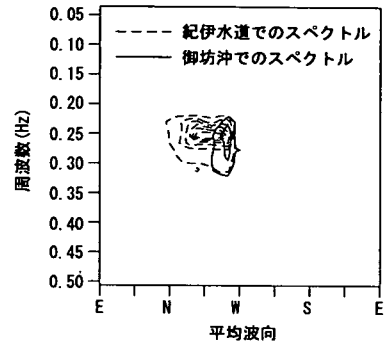


図-14 日ノ御崎による遮蔽の影響

方向のエネルギーが減少し、平均波向がWNW方向に変化していることがわかる。

御坊沖に来襲するSW波は、徳島県の南沖付近から御坊沖までのフェッチで発達したものである。西高東低の気圧配置のとき御坊沖付近では西北西~北西の風が吹き、WNW~NW波が生じると考えられる。しかしながら、御坊のWSW方向のフェッチは四国があるために短く、WSW方向の波はあまり発達せず、フェッチの長いSW方向からの波浪が卓越する。これに紀伊水道で発達し日ノ御崎の遮蔽で方向を変えたW波が加わり、多峰型方向スペクトル波となっていると考えられる。これもSWANによって確かめた。四国から紀伊半島付近にかけて紀伊水道も含めて風速10m/sの西北西の様な風が吹いているとして、御坊沖観測点での方向スペクトルをSWANによって推算した。計算した結果を図-15に示している。これから、WNWの様な風によって御坊沖には徳島沖で発達したフェッチの長いSW波が来襲することがわかった。また図中には、紀伊水道で発達し日ノ御崎で遮蔽されたWNW波も表されており、多峰型方向スペクトル波になることも確かめられた。ただし、観測されたSW波の平均周期は約5.5~7.5sであるのに対して、SWANによって推算されたSW波のピーク周期は4.5sであり、推算した周期の方

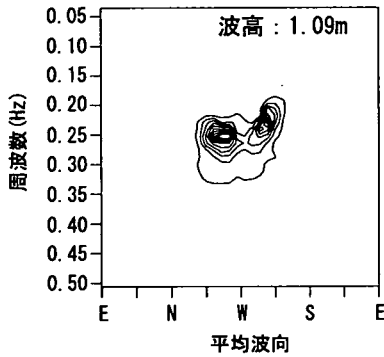


図-15 御坊沖における西高東低時の波浪

が短い。これは、観測波浪は計算領域に入っていない徳島県室戸岬方向から来る周期の長い波浪も含んでおり、波群の平均として周期が長くなっていると考えられる。

図-12(c)には一点だけプロットされており、高知沖では30cm以上の波浪はほとんど来襲していないことがわかる。これは、高知沖の西側は陸地で御坊沖のように海域が開けておらず、NW波が発達するだけの吹送距離がないためである。また、足摺岬からの高知沖観測点の方向は北北東で、足摺岬沖のNW波とは向きがほぼ90度違うことから考えて、その影響はほとんどないと考えられる。したがって、西高東低時の北西風による波浪は、高知沖にはほとんど来襲しないと考えられる。

(2) 温帯低気圧と波浪

日本列島付近を通過する低気圧には、シベリア方面に発生する低気圧以外にも揚子江方面に発生する低気圧や東シナ海低気圧がある。揚子江方面に発生する低気圧は1~6月に、東シナ海低気圧は2~4月に発生する。これらの低気圧が日本の南の海上を通過すると、平均周期が7.0s以上の比較的周期の長い波浪が、それぞれの観測点に来襲することがわかった。これは観測点の南の海上数100km付近で発達した風波が、風域を抜け出しうねりとして来襲したものと考えられる。また、低気圧が北寄りの経路を通ると、低気圧の先端が観測点より北側を通過し観測点付近はその風域に入る。この場合は、波向Sで周期が4s程度の風波も来襲する。

図-16に1999年4月23日9時の気圧配置を示している。これは移動性低気圧が御前崎に接近してきているときのものである。低気圧の東側では北東の風が吹くことが多い。つまり、御前崎沖の西側に低気圧が近づくと駿河湾には北東の風が吹く。この風によって生じたNE波が御前崎に来襲する。また、北東の風に加えて低気圧の南側で南風が吹く。これによって生じたS波もSE波として同時に来襲し多峰型方向スペクトル

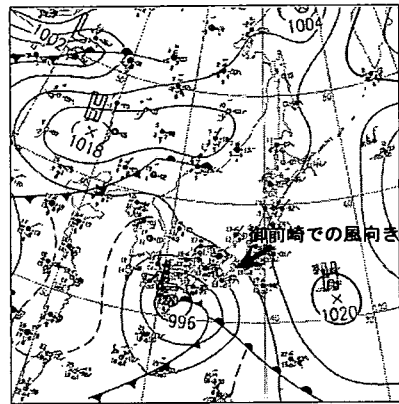


図-16 低気圧が接近したときの気圧配置 (1999/4/23 9:00)

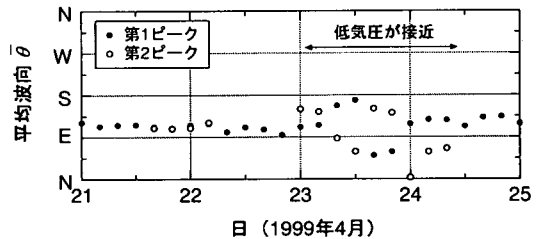


図-17 御前崎に低気圧が接近したときの波向

となる。例として、低気圧が御前崎付近を通過したときの波向の時系列を図-17に示す。この図でわかるように、多方向型の多峰型方向スペクトル波が来襲している。

また、低気圧が通過した後は局所的に御坊付近で等圧線が南北になる。この場合、冬場の西高東低の気圧配置と同様に紀伊水道付近に北西の風が吹き、御坊沖には平均波向Wの波浪が来襲する。しかしながら、揚子江方面に発生する低気圧や東シナ海低気圧の進行速度は速く、西高東低の気圧配置が続く時間と比べると等圧線が南北になる時間は短い。したがって、波向Wの波浪は長くは続かない。この例を図-18に示す。これは低気圧が御坊付近を通過したときの波向の時系列である。1999年3月21日に御坊の南海上を通過し、22日には三陸沖に低気圧が移動した。御坊の南に位置するときはS波が来襲し、通過後W波に変わる。また、W波は20時間程度しか続かないこともわかる。W波が来襲している間に南海上に他の気象擾乱がある場合、W波とあわせてS波も来襲し多峰型方向スペクトルが観測される。

(3) 停滞前線と波浪

6月中旬~7月中旬の梅雨の時期と9~10月の秋雨の時期に日本列島には前線が停滞する。この停滞前線に

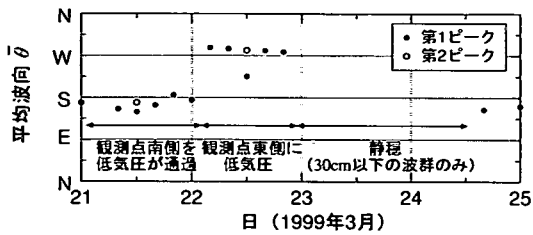


図-18 御坊を低気圧が通過した後の波向



図-19 梅雨時期の御坊沖の波高

は南北から同時に風が吹きこむ。梅雨前線が停滞したときの御坊沖における波高の時系列を図-19に示す。ただし、ここでの波高とは方向スペクトル全体を積分して求めたものである。また、6月17,24,27日には前線は北上し観測点付近あるいはそれより北側に位置した。このことは、前線が南海上に停滞しているときに比べて、日本列島付近に北上しているときの方が波高が大きいことを示している。

太平洋側においては停滞前線が観測点よりも南に位置する場合、前線に吹き込む南風によって風波が発達する。また、停滞前線よりはるか南の海上にある台風や熱帯低気圧によってうねりも進行してくる。停滞前線より北側では北風が吹いている。外洋からのS波と北風によって生じた風波が重なって、多峰型方向スペクトル波となることが考えられる。しかしながら、上で述べたように前線が南海上に停滞している場合、多峰型方向スペクトルとはならず大きな波浪は来襲しない。これは北風がS波に対して逆風となって、南からの高波浪が減衰しているためだと考えられる。

北風によってS波が減衰し多峰型にならないと述べたが、逆風によってどの程度波浪が減衰するのかをSWANを用いて調べた。図-20に示すような計算領域が100×100kmとなる深海モデルを考えた。20m/sの南風を6時間吹かせ風波を発達させた後、20m/sの北風に変えた。図-21に8時間後の方向スペクトルを示している。ただし、計算領域の南側境界から北方向に10km地点のもの(図-20のA地点)を(a)に、90km地点のもの(図-20のB地点)を(b)に示している。つまり、(a)はフェッチが短いので風波を、(b)はフェッチが長くとねりを示している。また、図中の数字は各ス

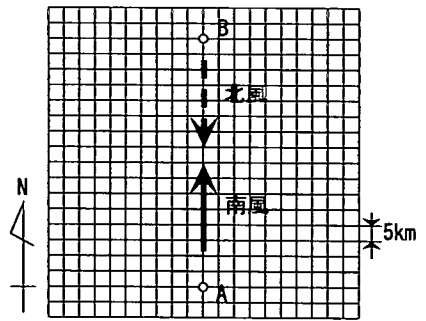


図-20 逆風効果の計算格子

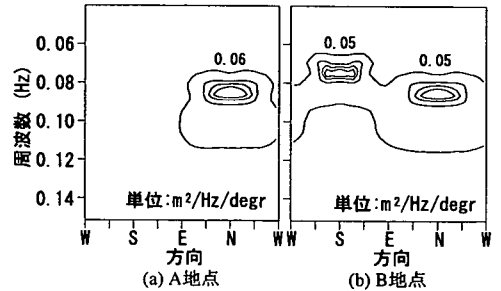


図-21 SWANによる逆風の効果

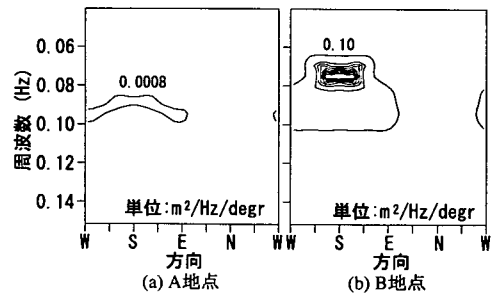


図-22 無風状態での波浪の減衰

ベクトルのピーク強度である。北風による減衰の影響を調べるため6時間後以降に北風を吹かせないものも計算した。それを図-22に示す。これも8時間後の推算方向スペクトルである。図-21と22の(a)のスペクトルを比較すると、図-22には残ってるSからの風波が図-21には残っていない。また、(b)のうねりの減衰についても、図-22に示すようにS波のピーク値が0.10m²/Hz/degであるのに対して図-21では0.05m²/Hz/degしかない。したがって、北風を吹かせた場合の方がS波は早く減衰する。このようにSWANモデルにおいても逆風による波浪の減衰を考慮しており、実海域においても停滞前線に吹き込む北風によって同様にS波が減衰していると考えられる。

停滞前線を低気圧が移動してくる場合や太平洋高気圧が強くなったとき前線は北上する。このようにし

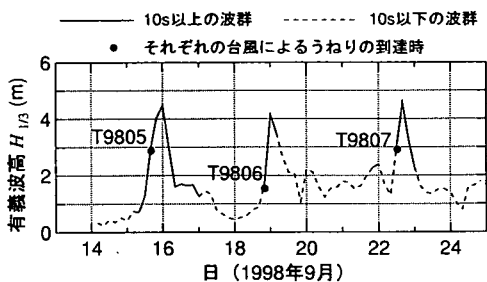


図-23 高知沖における1998年9月の波高

て、停滞前線が観測点の少し北に位置する場合、北風で南からの波浪を減衰することができず高波浪が来襲する。低気圧が移動してくることによって停滞前線が北上した場合、低気圧の南で発達した風波が南から観測点に来襲する。このとき、波浪観測によると有義波高が2m以上になることが多い。また、太平洋高気圧の勢力が強くなり前線が北上した場合も、南からの風波やうねりが来襲する。これが図-19の6月17,24,27日の高波浪時に相当し、北風による逆風の減衰効果があることを示している。

停滞前線が観測点よりもさらに北に位置し、日本海付近に停滞する場合を考えると、前線は太平洋から離れており、前線に吹き込む南風によって太平洋側では大きな波浪は発達しない。ただし、太平洋側にある他の気象擾乱によるS波は、停滞前線北側の北風によって減衰されない。

(4) 台風と波浪

太平洋側の観測点には、台風によって発生したうねりと風波が同時に来襲し多周期型の多峰型方向スペクトルとなると考えられる。うねりが到達し始めて多峰型になる時間は、船舶の係留などにとって非常に重要である。そこで、台風によって生じた波浪の特性を調べた後、波高の時系列と台風の経路を用いて、いつうねりが来襲し始めるかを簡便に予測する方法を検討した。

図-23に、1998年9月の高知沖の有義波高の時系列を示している。ここでの波高は、波群毎に求めた波高である。平均周期が10s以上の波群は実線で、10s以下のものは点線で示している。また、1998年9月に日本に接近した台風T9805～T9807の経路と通過時間を図-24に示している。これらから、台風T9805～9807によって平均周期10s以上で有義波高4m以上の波浪が来襲したことがわかる。本研究に使用した1年分の波浪データにおいて、図-23に示した時系列の期間以外で台風によって波高が4m以上になったのは、1999年7～8月に発生したT9905とT9908によるものである。この台風による波浪も平均周期がおおよそ10s以上で

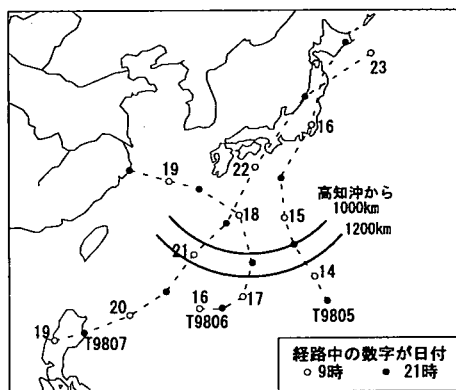


図-24 T9805～T9807の経路図

あった。したがって、台風が日本付近に接近し波高が大きくなると、その平均周期は10s以上になると考えられる。

図-23に示した期間において、周期が異なる波群による多峰型方向スペクトルは出現していない。これらの台風による波浪は、周期が4～6sの風波と10s以上のうねり以外にも6～10sの波浪を含み、周波数スペクトルにおいて明確なエネルギー強度の落ち込みがなかったためだと考えられる。つまり、本研究ではスペクトル中の2つのピーク間に谷がある場合を多峰型としているため、上記のような場合、単峰型と判定される。しかしながら、台風が接近してくると波高が大きくなり平均周期が10s以上と長くなることから、風波以外にもうねりも来襲している。このような風波とうねりを同時に含む単峰型方向スペクトル波は、多周期型の多峰型方向スペクトル波と同様の特性を有するものと考えられる必要がある。また、台風による波浪の代表波浪諸元からスペクトルを推定する場合、既存の理論的なスペクトルよりも波浪の周期幅が広がる可能性があることに注意しなければならない。

上記のことを考慮して、風波以外に大きなうねりが到達し始める時刻を、平均周期が10s以上で4時間前の波高と比べて約2倍以上になる時とした。この基準によると、台風T9805～T9807による大きなうねりの到達開始時刻は、それぞれ15日16時、18日20時、22日12時である。図-23にその時刻を「●」で示している。また、表-1に到達開始時刻とその4時間前の波高と周期を示している。例えば、T9805による波浪の影響を大きく受ける9月15～16日において、15日12時の波高と周期が1.28mと10.43sであったのに、その4時間後には2.92mと11.93sとなっている。平均周期は10s以上で波高比が2.28と2倍以上になっており、12～16時の間に大きなうねりは到達し始めたと考える

表-1 うねりの到達開始時刻の波高・周期

T9805	到達 4 時間前	到達開始時刻
有義波高	1.28m	2.92m
平均周期	10.43s	11.93s
T9806	到達 4 時間前	到達開始時刻
有義波高	0.88m	1.68m
平均周期	9.11s	14.75s
T9807	到達 4 時間前	到達開始時刻
有義波高	1.30m	2.99m
平均周期	9.33s	15.51s

表-2 うねりが発生した位置と時刻

	うねりの発生位置	うねりの発生時刻
T9805	1200km	14 日 10 時
T9806	1000km	18 日 00 時
T9807	1000km	21 日 17 時

11.93s, 14.75s, 15.51s である。これから、発生位置は高知から約 1000~1200km であることがわかった。うねりの平均周期が $\bar{T} = 14s$ であると仮定すると、1000~1200km の距離を伝播するには、21.2~25.4 時間かかる。これから、観測点から見通すことができる南太平洋で、東海四国沿岸から 1000~1200km の距離に台風が存在する場合、おおよそ 1 日後にうねりが来襲し始めるとすることができる。

6. おわりに

本研究では、御前崎沖と御坊沖、高知沖において観測された波の方向スペクトルを用いて、それぞれの地点での多峰型方向スペクトル波を含めた来襲波浪の特性とそれを発生させた気象配置との関係を調べた。その際、方向スペクトル中の各ピークに 1 つの波浪をあてはめることによって多峰型を考慮した。波浪の特性とその気象配置に関して得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 御前崎沖の観測点には、外洋からの S 波が屈折し SE 波として来襲することを SWAN モデルによって示した。御坊沖の観測点では、冬季の西高東低時や低気圧の通過後に紀伊水道で発達した NW 波が日ノ御崎による遮蔽で W 波として来襲することがわかった。また、高知沖には遮蔽や屈折の影響で主に S 方向からの波が多く来襲することを示した。
- 2) 御前崎沖と御坊沖、高知沖の 3 地点ともに、波高が 1~2m のときに全方向スペクトルに占める多峰型の割合が最も大きくなる。波高 2m 以上では第 1 ピークが他のピークよりも突出するために、波高が大きいほど多峰型の割合は小さくなる。波高 1m 以下では、多峰型の判定基準の影響で波高が小さいほど多峰型の割合は小さくなることがわかった。
- 3) 御前崎沖に低気圧が近づき温暖前線が西側に位置すると、駿河湾に北東の風が吹き NE 波が来襲することを示した。この NE 波と外洋からの SE 波で多峰型方向スペクトル波が生じる。御坊では西高東低の気圧配置時に W 波と外洋方向からの SW 波によって多峰型方向スペクトル波が生じる。また、低気圧通過後 W 波が来襲し、他の気象擾乱が観測点南側にあるとそれによる S 波も同時に来襲し多峰型となる。3 地点共通の多峰型方向スペクトル波は、夏場

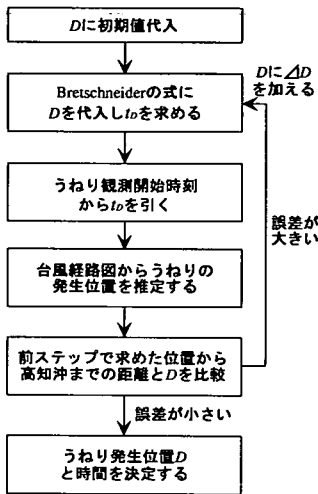


図-25 うねりの発生位置と時刻の推定方法

ことができる。

次に、うねりが発生した位置と時刻を求める流れ図を図-25 に示している。Bretschneider によると、うねりの到達時間 $t_D(s)$ と距離 $D(m)$ には以下に示す関係がある⁶⁾。

$$t_D = \frac{4\pi D}{gT_{1/3}} \quad (1)$$

式(1)に有義波周期 $T_{1/3}$ を代入すると到達時間 t_D と距離 D の関係式が得られる。ただし、本研究で得られている周期は平均周期なので、 $T_{1/3} \approx 1.2\bar{T}$ として有義波周期を求めた。この式の D に 500km 程度の小さな値を初期値として代入し t_D を求め、うねりの到達開始時刻から t_D を引くことによって、うねりが発生した時刻を推定する。この時間における台風の位置を図-24 を利用して求めた。高知からこの位置までの距離を D と比較し、ほぼ同じ値になるまで距離 D を ΔD ずつ増加させていくことによってうねりが発生する位置を求める。ただし、 ΔD は距離 D の増加幅で 200km 程度とした。

表-2 に、うねりが発生した位置（高知からの距離）と時刻を求めた結果を示している。ただし、式(1)に代入した平均周期は、T9805~T9807 それぞれ

の風波とうねりで構成された多周期型である。この多峰型方向スペクトル波は、本研究で挙げた3地点以外の太平洋側の地点にも来襲すると考えられる。

- 4) 梅雨や秋雨の時期における停滞前線と波浪との関係をSWANモデルによって推測した。前線が観測点の南側にある場合、前線北部の北風によってS波が減衰し、N波とS波の多峰型にはならないことを示した。また、前線が北上すると観測点に高波浪が来襲することがよく起こる。
- 5) 台風が日本に接近し大きな波群が来襲する場合、その平均周期は10s以上になる。このときの方向スペクトルが単峰型であっても、単一波群に風波とうねりを含んでおり多周期型の多峰型方向スペクトル波と同様に扱う必要がある。観測点から見通すことができる南太平洋で東海四国沿岸から1000~1200kmの距離に台風があると、およそ1日後にうねりが来襲し始めることがわかった。

今後は、いくつかの太平洋側における波浪データをもとに、観測データがない地点に対しても波浪を予測できるように標準的な方向スペクトルの出現特性について検討していく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、方向スペクトル算定プログラムを独立行政法人港湾空港技術研究所の橋本典明室長に提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 高山知司, 高橋英紀, 永井紀彦: 御前崎沖における多峰型方向スペクトル波の出現特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.76-80, 2000.
- 2) 橋本典明, 永井紀彦, 浅井正, 菅原一晃, 久高将信, 小野修平: 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, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.136-140, 1993.
- 3) 高山知司, 橋本典明, 永井紀彦, 高橋智晴, 佐々木弘: 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.176-180, 1992.
- 4) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.17-25, 1977.
- 5) Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.M., Kriezi, E.E.: SWAN Cycle3 version 40.11 USER MANUAL, pp.8-30, 2000.
- 6) Bretschneider, C.L.: Decay of wind generated waves to ocean swell by significant wave method, *Fundamentals of Ocean Engineering* Vol.8, pp.36-39, 1968.

(2002.3.13 受付)

MULTI-PEAKED DIRECTIONAL WAVE SPECTRA AND THEIR RELATED METEOROLOGICAL CONDITIONS

Tomotsuka TAKAYAMA, Hidenori TAKAHASHI,
Masao KITANO, Toshihiko NAGAI

Recently it has been reported that a lot of directional random wave groups with multi-peaked spectra are observed at a place faced to an open sea. They considerably affect technical matters like the tranquility in a harbor. However, their occurrence characteristics have been known little. In the present paper, we have investigated the occurrence characteristics of directional random waves off Omaezaki, Gobo and Kochi. Furthermore the meteorological conditions which generate multi-peaked directional random waves are investigated in reference of weather charts. It is concluded that multi-peaked spectra are composed of long and short period waves from the south and wind waves developed around the observation point and affected by circumferential geography.