

スペクトル波候学に関する研究

山口正隆*・大福 学**・畑田佳男***・川上 聡****

1. 緒 言

短期波浪統計の分野では、波浪の統計的特性を記述するため、波別解析法およびスペクトル解析法の2つの手法が適用されてきた。一方、波浪の長期的変化を取り扱う波候統計の分野では、有義波の期間(日, 週, 旬, 月, 季節, 年)別平均値や標準偏差および頻度分布などの特性を解析する方法が用いられる。この方法は短期波浪統計において使用される波別解析法に相当するものであるが、もう1つの方法であるスペクトル解析法も波候統計の分野で使用しうると考えられる。

スペクトル解析によれば、長期波浪記録に占める特定の卓越周期成分の存在や各周期成分のエネルギー配分率(スペクトル形状)、波高記録と周期記録の周波数別相関度などが得られるので、これらの指標によって特定地点の波候特性を記述できると考えられる。こうした方法は、気象学ではスペクトル気候学と呼ばれる一分野を形成していることから、海岸・海洋工学の分野では、これに類してスペクトル波候学と呼ぶことができよう。

さて、長期波浪観測資料に対するスペクトル解析に基づいて、わが国沿岸における波候の地域特性を検討した研究事例は山口ら(1989)、小舟(1990)、山口ら(1991)のわずか3例にすぎず、周期時系列についての検討例は皆無である。そこで本研究では、わが国沿岸11地点で取得された気象庁長期波浪観測資料を波高のみならず周期にも着目してスペクトル解析し、得られたスペクトル特性量を用いて日本沿岸各地の波候を考察することにより、スペクトル波候学の展開をはかろうとするものである。

2. 波浪観測資料および解析法

解析対象とする波浪観測資料は、図-1に示すように、気象庁が展開しているわが国沿岸11地点での3時間ごとの波浪記録のうち、観測開始年から1989年12月31日の間における有義波資料であり、観測期間および資料数

は経ヶ岬の約14年間、39444個から尻羽岬における約5年間、13888個の間にある。気象庁波浪観測資料の特徴は、波高計の設置水深が42~57mと大きく、しかも測得率が非常に高い点にあるが、観測施設の老朽化のためか、1980年代後半から長期欠測がみられるようになっているので、本研究では、観測開始以来1987年末あるいは1989年末までの観測資料をスペクトル解析の対象とする。この場合の測得率の最低値は佐喜浜における0.95であるが、スペクトル解析では連続資料を必要とすることから、波浪観測資料の欠測部を補うために、欠測部分を除く時系列の平均値を欠測部に補充した。

波浪観測資料の時間スケールは10数年に及ぶことから、データを評価時間別に3時間ごとの時別値資料、日平均値資料および月平均値資料に分類したのち、それぞれをスペクトル解析する。波高および周期の時別値資料に対して、Blackman-Tukey法(BTM)によるスペクトル解析およびクロススペクトル解析を行い、卓越周期成分無次元スペクトル値 $fE(f)/\epsilon$ と周期帯別無次元エネルギー $\int E(f)df/\epsilon$ (周期帯365日~91.3日, 91.3日~8.1日, 8.1日~0.25日)、位相角 $\phi(f)$ およびコヒーレンス $\gamma(f)$ を求める。ここに、 f :周波数、 $E(f)$:周波数スペクトル、 $\epsilon = \int E(f)df$ である。BTMの適用にあたっては、lag $m=1460$, 時間間隔 $\Delta t=3$ hr, 周波数分解能 $\Delta f = 1/(2m\Delta t) = 1/(2 \times 1460 \times 3) (1/\text{hr}) = 1/365 (1/\text{day})$ の条件を用いる。自由度は19~54である。

また、日平均値資料および月平均値資料に対しても



図-1 波浪観測点の位置

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科
 ** 愛媛大学技官 工学部土木海洋工学科
 *** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科
 **** (株)フジタ建設コンサルタント

BTMによるスペクトル解析と卓越周期成分無次元スペクトル値, 周期帯別無次元エネルギー, 位相角およびコヒーレンスの算出を行う. 評価時間別スペクトルの周波数分解能を $\Delta f = 1/360 \sim 1/365$ (1/day) とほぼ同一にするため, スペクトル解析条件は, 日平均値資料では $m = 182$, $\Delta t = 1$ day, $\Delta f = 1/364$ (1/day), 月平均値資料では $m = 6$, $\Delta t = 1$ month, $\Delta f = 1/12$ (1/month) とする.

つぎに, 月平均値がほぼ1年周期で繰り返すことを考慮して, 月平均値資料を累年月別平均値資料 (12ヶ月分12個) と, それからの変動成分 (月別偏差資料) に分離したのち, 累年月別平均値資料を Fourier 解析することにより, 1年, 6ヶ月, 4ヶ月成分の振幅 A_1, A_2, A_3 を算出する. 一方, 月別偏差資料に対しては, そのデータ数が少ないことを考慮して, 周波数分解能が高い最大エントロピー法(MEM)によるスペクトル解析を行う. MEMの適用にあたっては, 予測誤差フィルターの項数を $M = 2\sqrt{n}$, (n : データ数) とする.

3. 長期波浪のスペクトル特性

図-2は評価時間別スペクトルを重ね合わせた結果を太平洋側の石廊崎, 日本海側の経ヶ岬および東シナ海側の福江島について示したものであり, 波高および周期に関するスペクトルやエネルギーを区別するため, 図ではそれぞれ添字 H および T を付加している. これによると, 周波数分解能の若干の相違により月平均値スペクトルにやや違いがみられるものの, 周波数分解能 Δf をほぼ同一にすれば, 各スペクトルは重なることがわかる. したがって, 長周期成分に注目すれば, 評価時間は長くてもよいといえる.

また, スペクトル形状には海域ごとの特徴がみられる. すなわち, 太平洋側では, スペクトル形状は長周期側~中間周期帯と短周期側の2つに分かれる. 長周期側では, 周期の減少に伴い, スペクトル値が緩やかに減少するが, 短周期側では, 波高の場合には-1.9程度, 周期の場合には-1.4程度の勾配で低減し, M_2 分潮周期に相当する0.518日(12.4時間)にピークが存在する. 長期変化に注目すれば, これは, 春の低気圧や秋の台風, 冬季季節風に伴い, 太平洋側での波浪が1年周期のみならず6ヶ月以下の周期で変動する傾向をもつことを意味する. 一方, 冬季に風波が卓越し, 夏季に静穏状態が続く日本海側では, スペクトルの長周期側で1年周期成分が卓越する. 中間周期帯および短周期側でのスペクトルは太平洋側と同様の形状を示すが, 1日および0.518日に突出したピークをもつ松前を除いて, 卓越したピークはみられない.

東シナ海側の福江島における波高スペクトルは, 長周期側では, 日本海側ほどでないにしても, 1年周期に卓越したピークをもつが, 周期スペクトルは太平洋側と同

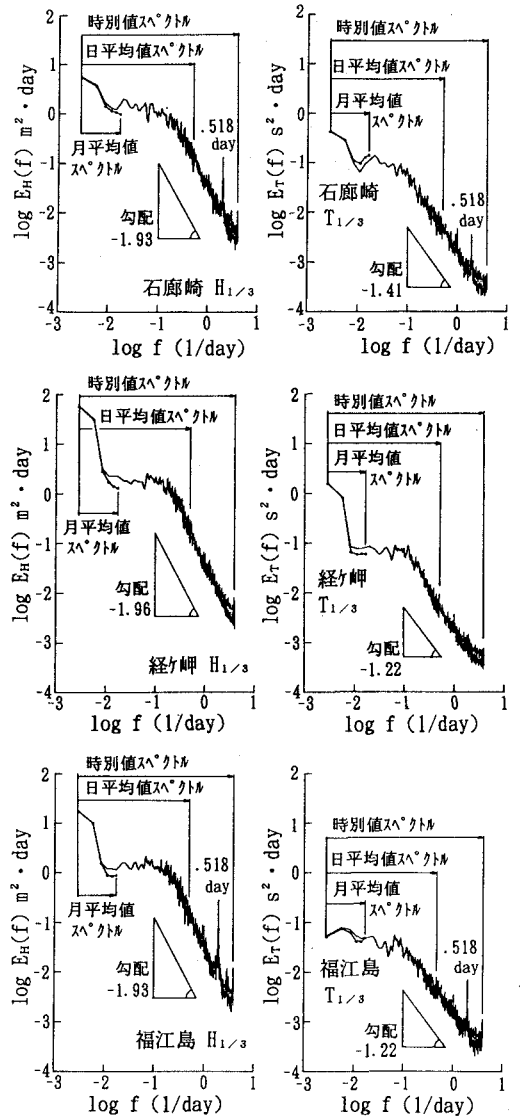


図-2 評価時間別波高・周期スペクトル

様になだらかな曲線を描く. 中間周期帯はともに白色雑音的であり, 短周期側では, 太平洋側と同様に0.518日の位置にピークをもつ. つまり, 東シナ海では, 波高時系列は日本海同様明確な1年周期で変化するのに対し, 周期時系列における1年周期の変動は夏季や秋季のうねりの存在によりほとんど目だたない.

図-3は位相角とコヒーレンスの沿岸分布図である. 太平洋側の場合, 長周期側では, 位相角は, 6ヶ月以上の成分が140°程度をとる石廊崎を除いて, $\pm 40^\circ$ 内の値を示し, コヒーレンスも0.7以下である. また, 短周期側では, 各周期成分ごとの変動が激しすぎて一定の傾向をもたない. 一方, 日本海側の場合, 長周期側での位相角は

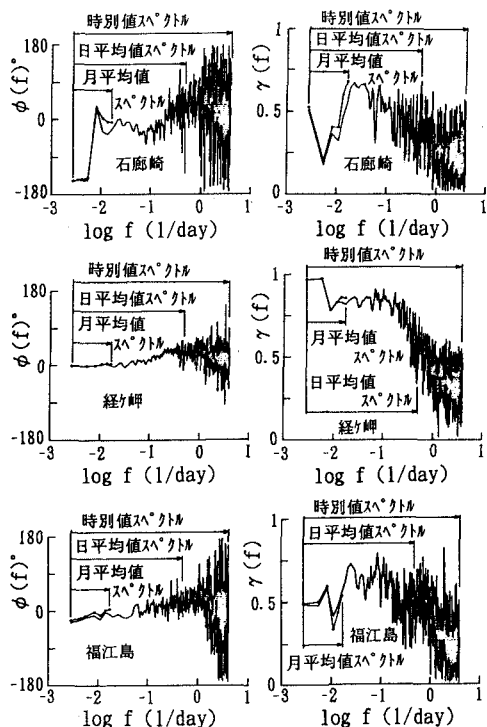


図-3 評価時間別位相角およびコヒーレンス

ほぼ0°で、波高と周期時系列が同位相をとり、コヒーレンスも1に近い。東シナ海側の場合、長周期側の位相角は0°に近い負値をとるが、コヒーレンスは日本海側よりかなり低く、太平洋側に近い。これらのことから、東シナ海側における波浪スペクトルは日本海側および太平洋側の両者の特性を兼ね備えているといえる。

つぎに、図-2に示したように、波高・周期スペクトルにはピークをとる周期がいくつかみられる。これらは地点ごとに異なるけれども、10日以下の短周期側では、8~9日、5~6日、1.08日、1日、0.518日、0.5日などの周期が比較的安定的に存在する。このうち、5~6日周期は高気圧・低気圧の通過というシノプテックなスケールの気象擾乱の周期、1日および0.5日周期は海陸風周期、0.518日はM₂分潮周期に対応するが、とくに0.518日成分は地点によっては顕著に卓越する。

図-4は5.89日成分に対する無次元波高・周期スペクトル値 $fE(f)/\epsilon$ と位相角およびコヒーレンスの沿岸分布を示したものである。この場合、各地点の平均波高あるいは平均周期が異なることから、 $fE(f)/\epsilon$ という無次元形で相対的な比較を行う。これによると、波高・周期スペクトルはいずれも日本海側でやや大きく、太平洋側で小さい傾向を示す。位相角は全般的に0°に近いが、日本海側に比べて太平洋側では地点ごとの変動が大きい。ま

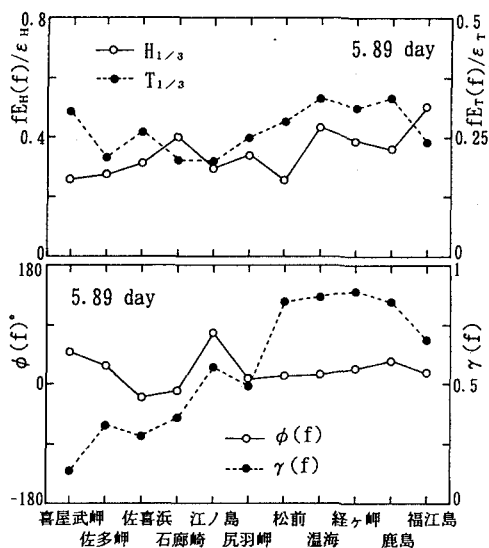


図-4 無次元波高・周期スペクトル、位相角およびコヒーレンスの沿岸分布 (5.89日成分)

た、コヒーレンスは日本海側では0.8以上の値をとるのに対して、太平洋側ではほぼ0.5以下である。以上の点から、準閉鎖海域である日本海側では、とくに冬季に低気圧の通過に伴い、ほぼ1週間を単位とした波高・周期の増加・減少が顕著であるのに対して、太平洋側では、常時存在するうねりの影響によってこの特徴が若干不明瞭になっているのではないかと推測される。なお、東シナ海側では、日本海側と太平洋側の中間の特性がみられる。

図-5は0.518日成分に対する同様の図である。波高の場合、0.518日成分の卓越は太平洋側、東シナ海側のみならず日本海側の松前においてもみられるが、その相対的な卓越度が著しいのは石廊崎以西の太平洋側地点および東シナ海側の福江島であり、石廊崎以西の本土太平洋側では、西に向かうほど増加する傾向がみられる。周期の場合も同様であるが、江ノ島および佐喜浜での卓越はあまりみられないし、喜屋武岬での卓越度は小さく、逆に尻羽岬での卓越度は大きい。

位相角は、エネルギーの卓越度が大きい石廊崎以西の太平洋側地点では-120°~-180°の間にあるのに対して、他の地点では鹿島の40°、松前の-60°を除いて0°に近い。波高・周期は順流により減少・増加、逆流により増加・減少するから、潮流と波の相互作用が有意であるとするならば、石廊崎以西太平洋側地点での逆位相関係に対する定性的説明は可能であろう。しかし、この考え方では、同様に0.518日成分が卓越する福江島での位相角が0°という順位相関係を説明できない。コヒーレンスは、日本海側の温海、経ヶ岬、鹿島や太平洋側の佐喜浜を除いて、0.4~0.5以上であり、全体的に波高・周期成分間

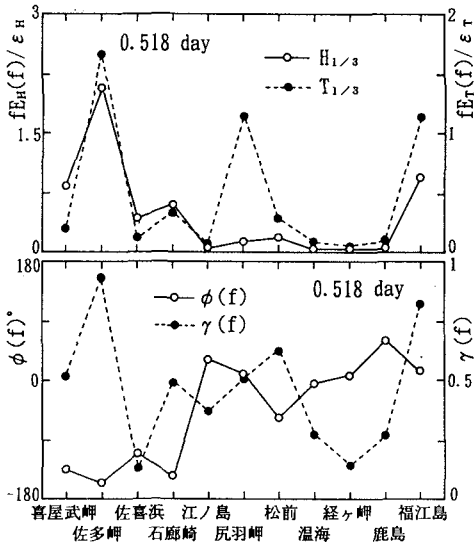


図-5 無次元波高・周期スペクトル, 位相角およびコヒーレンスの沿岸分布 (0.518日成分)

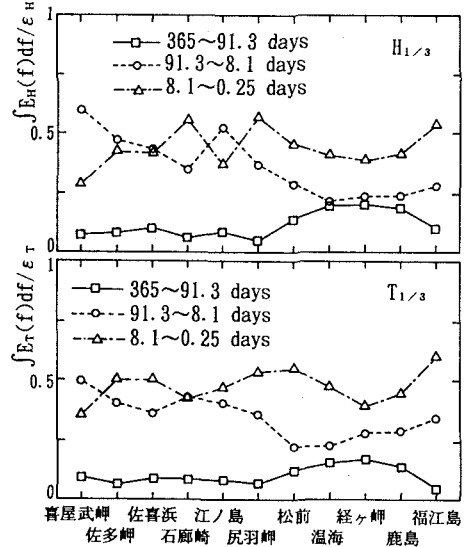


図-6 周期別無次元エネルギーの沿岸分布

の相関が比較的高いが、とくに福江島および佐多岬では0.9以上の値をとる。

図-6は周期別無次元エネルギー $\int E(f)df/\epsilon$ の沿岸分布を示したものである。365~91.3日の長周期帯では、1年周期の変動が卓越する日本海側が大きい値を示すし、太平洋側や東シナ海側での値はほぼ等しい。91.3~8.1日の中間周期帯では、太平洋側が東シナ海側や日本海側より大きいし、とくに周期エネルギー比は西南部から東北部に向かうにつれて減少する傾向にある。また8.1~0.25日の短周期帯では、他地点に比べて小さい値をとる喜屋武岬を除いて、波高エネルギー比の海域間の差はあまりみられないが、周期エネルギー比は日本沿岸中央部の石廊崎および経ヶ岬から東西にむけて増加する傾向にあるし、喜屋武岬では、長周期帯および中間周期帯での大きな値を反映して、短周期帯のエネルギー比がとくに小さい値をとる。

4. 月別平均波浪の周期特性

図-7は累年月別平均波高・周期の経月変化図である。これらは、波高・周期が明確な1年周期で繰り返すもの(東シナ海側の波高および日本海側の波高・周期)と、1年周期の変動が明確でなく、むしろ6ヶ月以下の変動がみられるもの(東シナ海側の周期および太平洋側の波高・周期)に分かれており、しかも地点により1年の周期性の強弱が異なる。

図-8は累年月別平均値資料に対するFourier解析から算出した1年、6ヶ月および4ヶ月成分の振幅 A_1, A_2, A_3 の沿岸分布図である。日本海側では、6ヶ月成分

および4ヶ月成分は両者とも1年成分の20%以下と小さく、したがって1年周期の季節変動が卓越する。一方、太平洋側では、1年成分が日本海側に比べてかなり小さく、石廊崎の波高あるいは尻羽岬の周期を除いて、6ヶ月成分が1年成分と同程度あるいはそれ以上の値をとる。また喜屋武岬の波高では、4ヶ月成分が卓越し、尻羽岬の波高や江ノ島の周期および波高では、6ヶ月成分のみならず1年成分および4ヶ月成分も大きい。以上のように、太平洋側では日本海側と比べて季節変動が小さく、1年周期のみならず6ヶ月周期以下の変動がみられる。しかも、たとえば波高についてみれば、4ヶ月成分の大きい南西諸島、6ヶ月成分が1年成分と同程度の値をとる四国・九州沿岸、他地点に比べて季節変動の小さい中部地方沿岸、6ヶ月成分の寄与が大きい東北・北海道沿岸というように、太平洋側であっても海域ごとに季節変動特性がかなり異なる。これは、太平洋側南西部では春の南岸低気圧と秋の台風の影響を強く受けるのに対し、東北部では春の南岸低気圧と秋の二つ玉低気圧の影

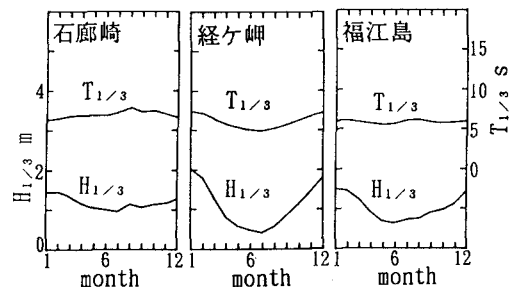


図-7 累年月別平均波高・周期の経月変化

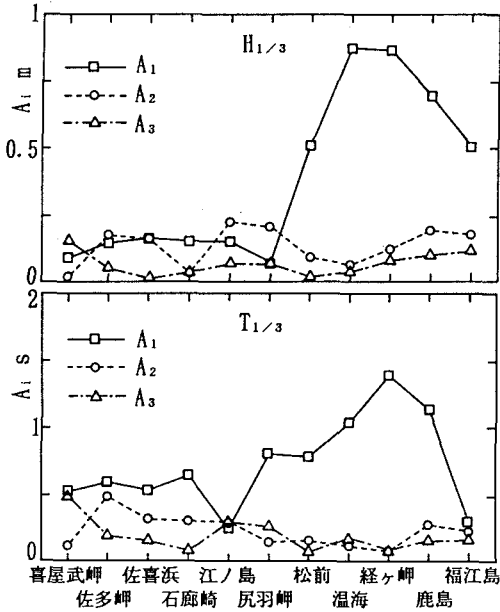


図-8 Fourier 係数の沿岸分布

響を受けるためであろう。

東シナ海側では、波高の1年成分は日本海側より小さいが、太平洋側の2倍以上の値をとるのに対して、周期の1年成分は太平洋側と同程度の値を示し、小さい。また、波高の場合、6ヶ月成分および4ヶ月成分はそれぞれ1年成分の35%および23%であり、1年成分が卓越する。一方、周期の場合、それぞれの割合は76%および54%となって、1年成分のみならず6ヶ月成分および4ヶ月成分も有意な値を示す。つまり、東シナ海における波高の季節変動は日本海側の変動に、周期の季節変動は太平洋側の変動に近いという特徴をもつ。

図-9は月別偏差資料に対するスペクトル解析結果の1例である。いずれのスペクトルも複数のピークをもつ

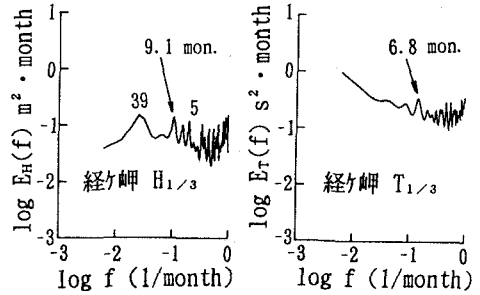


図-9 月別波高・周期偏差のスペクトル

ものの、スペクトルそのものがホワイトノイズ的である。

5. 結 語

本研究で得られた結果は次のように要約される。

- (i) 周波数分解能・対象期間を同一にすれば、各評価時間別スペクトルは重なることから、長周期成分に注目すれば、評価時間は長くてもよいといえる。
- (ii) 長期波浪スペクトルは日本沿岸各海域特有の形状をとることから、波候特性を記述するための統計量としてスペクトル特性量を使用することができる。
- (iii) 石廊崎以西の太平洋側や東シナ海側の波高・周期スペクトルは M_2 分潮周期に相当する 0.518 日 (12.4 時間) に鋭いピークをもつ。

参 考 文 献

小舟浩治 (1990): わが国沿岸における波浪観測手法と出現波浪の特性に関する研究, 港湾技研資料, No. 668, pp. 117-119.
 山口正隆・豊浦佳広・大福 学 (1989): わが国沿岸における波候特性の解析, 自然災害科学, 8-2, pp. 23-45.
 山口正隆・畑田佳男・大福 学・梅崎 剛 (1991): 日本海沿岸での気象・海象の周期性に関する考察, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 116-120.