

# 大阪湾における波浪特性

広瀬 宗一\*・高橋 智晴\*\*

## 1. はじめに

大阪湾においては、昭和52年末に泉州沖に観測塔（以後MT局と称する）が建設され、昭和53年より本格的な海上観測が開始された。観測塔は泉佐野市の沖合約6km（北緯34°25'49"，東経135°14'26"），水深約-19.5m地点に設置されている。観測塔周辺においては、波高（超音波式波高計，階段抵抗式波高計），流速（超音波式流速計，表層，中層および底層の三カ所），および風向・風速（プロベラ式風向・風速計）等が観測されている。波高計および流速計の設置水深は，それぞれ-18.5m，3m，9m，15mであり，サンプリング間隔および観測時間は底層で1.0秒，10分の他はいずれも0.1秒，13分となっており毎時あるいは連続観測がなされている。

本稿においては，これらの取得データを基に大阪湾における波浪の統計的性質の把握，および大阪湾内に侵入する長周期成分波のエネルギーの推定評価を試みたものである。サンプル数は僅か約100ケースであるが，多様な観測項目および観測地点の地理的特性は，集積されつつある沿岸波浪情報の活用方策の検討および波浪の数値計算等波浪に関連する諸条件の設定に寄与するものであると考え，ここに報告するものである。

## 2. 解析手法について

### 2.1 波浪の統計量について

任意の時間 $t$ における水面の上昇量を $\eta(t)$ として，この $\eta$ が正規分布をすると仮定すると，

$$p(\eta) = (\eta/\sqrt{2\pi}\eta_{rms}) \exp[-(\eta/\eta_{rms})^2] \quad \dots\dots(1)$$

ここに， $\eta_{rms}$ は $\eta$ の標準偏差を意味する。

しかし，波の非線型性が強くなってくると，式(1)に示した正規分布に従わなくなり，その程度は歪度(skewness)，尖度(kurtosis)により知ることができる。

$$\sqrt{\beta_1} = \bar{\eta}^3/(\bar{\eta}^2)^{3/2} \quad \dots\dots(2)$$

$$\beta^2 = \bar{\eta}^4/(\bar{\eta}^2)^2 \quad \dots\dots(3)$$

波高の分布については， $\eta$ が正規分布をし，かつ周期が狭帯域に分布をすると仮定すると次のようなRayleigh

分布になることが示され，有義波高 $H_{1/3}$ は $\eta_{rms}$ と次のように関連づけられる。

$$H_{1/3} = 4.004\eta_{rms} \quad \dots\dots(4)$$

### 2.2 波浪の統計量とスペクトルの関係

波の周波数スペクトル $S(f)$ の $n$ 次のモーメントは次式で与えられる。

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad \dots\dots(5)$$

(5)式に示すようにスペクトルのモーメント $m_n$ を定義すると，水位変動の標準偏差 $\eta_{rms}$ は0次のモーメント $m_0$ と次のような関係にある。

$$\eta_{rms} = \sqrt{m_0} \quad \dots\dots(6)$$

周期については，Riceの理論により観測時間を $t_0$ ，この間に含まれるゼロアップクロス点の数を $N_z$ ，極大点の数を $N_c$ とすると，

$$\left. \begin{aligned} T_z &= t_0/N_z = \sqrt{m_0/m_2} \\ T_c &= t_0/N_c = \sqrt{m_2/m_4} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(7)$$

の関係が $t_0 \rightarrow \infty$ の時確率1で成立する。ここに， $T_z$ ， $T_c$ はそれぞれゼロアップクロス周期，クレスト周期を意味している。

周波数スペクトルの形状を表わすパラメータとしては以下に示すようなものがよく用いられる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_S &= \sqrt{1 - (m_2^2/m_0 m_4)} \\ \varepsilon_T &= \sqrt{1 - (T_c/T_z)^2} \\ \nu_S &= \sqrt{(m_0 m_2/m_1^2) - 1} \\ Q_p &= (2/m_0^2) \int_0^\infty f S^2(f) df \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(8)$$

### 2.3 Riceの理論によって推定されるパラメータ

風波のスペクトル型に関してはこれ迄に種々の提案がなされ，港湾諸計画をはじめとする諸分野に活用されているが，現在のところこれらのスペクトル型の成立する必然性はなく，工学的な活用面から暫定的に用いられているにすぎない。これらのスペクトル型は一般に次のような形をしている。

$$S(f) = A f^{-5} \exp[-B f^{-4}] \quad \dots\dots(9)$$

この型は海洋波のスペクトルをよく近似することがこれまでの多くの研究成果により示されている。しかしながら，このようなスペクトル型を用いると，(8)式に

\* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部海象観測研究室  
\*\* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部海象観測研究室長

示したスペクトル形状を表わすパラメータの内  $\nu_S$  は

$$\nu_S = \{\Gamma(1) \cdot \Gamma(1/2) / \Gamma(3/4)^2 - 1\}^{1/2} \doteq 0.4247 \quad (10)$$

のように一意的に決定されてしまい、一部の波浪諸元も以上に示すように Phillips による普遍常数  $\alpha$  とスペクトルのピーク周波数  $f_p$  だけで決定されてしまうことになる。なお、 $\Gamma$  はガンマ関数を意味する。

(9) 式に 2.1 および 2.2 に示した波浪の統計量の関係を用いると、

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 4.004 \sqrt{m_0} = 4.004 \sqrt{\alpha/5g(2\pi f_p)^{-2}} \\ T_{02} &= \sqrt{m_0/m_2} = (4/5\pi)^{1/4} f_p^{-1} \\ &\doteq 0.7104 T_p \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Bretschneider は (9) 式に示したスペクトル型に対して、ピーク周期で正規化したスペクトル型とピーク周波数で正規化したスペクトル型を関連づけるのに次式に示す関係を用いている。

$$T_p = \sqrt[4]{5/4} T_{1/3} = 1.057 T_{1/3} \quad (12)$$

一方、光易は経験的に、

$$T_p = 1.05 T_{1/3} \quad (13)$$

の関係を設定している。

本稿では海洋波の周波数特性だけに着目して Rice の理論の成立を仮定することにより、スペクトルのモーメントで定義される周期パラメータ、および周期等を推定することを考える。

今、水位記録  $\eta(t)$  が  $E[\eta(t)] = 0$ ,  $E[\eta^2(t)] = 1$  を満足するように正規化された弱定常過程であるとし、次式で示すガンマ分布型でスペクトル型が近似できるものとする、

$$S(f) = [\lambda^r / 2\Gamma(r)] f^{r-1} \exp[-\lambda f] \quad (14)$$

ここに、 $f > 0$  であり、 $r (> 0)$ ,  $\lambda$  は未知パラメータである。

不規則過程  $\eta(t)$  は正規化されていると仮定しているので次式が成立する。すなわち

$$E[\eta^2(t)] = R(0) = 2 \int_0^\infty S(f) df = 1 \quad (15)$$

ここに、 $R(0)$  はラグ 0 の自己相関係数を意味する。

(14) 式に示したガンマスペクトルに Rice の理論を適用すると、

$$\begin{aligned} N_z/t_0 (=1/T_z) &= \sqrt{m_2/m_0} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty f^2 S(f) df}{\int_0^\infty S(f) df}} \\ &= (1/\lambda)[r(r+1)]^{1/2} \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_0/t_0 (=1/T_0) &= \sqrt{m_4/m_2} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty f^4 S(f) df}{\int_0^\infty f^2 S(f) df}} \\ &= (1/\lambda)[(r+2)(r+3)]^{1/2} \quad (17) \end{aligned}$$

(16), (17) 式は  $t_0 \rightarrow \infty$  のとき確率 1 で成立する。

このように  $t_0$  に対して  $N_z$  (あるいは  $T_z$ ),  $N_0$  (あるいは  $T_0$ ) が与えられれば (14) 式に示すスペクトル型を規定する未知パラメータ  $\lambda$  と  $r$  は決定することができる。すなわち、(16) および (17) 式を連立方程式として解くと、

$$r = \frac{5N_z^2 - N_0^2 + \sqrt{N_z^4 + 14N_z^2 N_0^2 + N_0^4}}{2(N_z^2 - N_0^2)} \quad (18)$$

(18) 式を (16) 式に代入すると、

$$\lambda = \frac{t_0}{N_z} [r(r+1)]^{1/2} \quad (19)$$

のように  $r$ ,  $\lambda$  が求められる。

(18) 式の分母、分子を  $N_z^2$  で割り、 $\varepsilon_T$  を用いて表わすと、

$$r = \frac{4 - 5\varepsilon_T^2 + \sqrt{16 - 16\varepsilon_T^2 + \varepsilon_T^4}}{2\varepsilon_T^2} \quad (20)$$

一方、(14) 式で与えられるスペクトルのピーク周波数  $f_p$  の推定値  $\hat{f}_p (=1/T_{p1})$  は  $\partial S(f)/\partial f = 0$  より次のように求められる。

$$\hat{f}_p (=1/T_{p1}) = (r-1)/\lambda \quad (21)$$

また、スペクトル 0 次のモーメントと 1 次のモーメントの比によって定義される周期  $T_{01} (=m_0/m_1)$  の推定値  $T_{R1}$  およびスペクトル幅パラメータ  $\nu_T$  も同様に求めることができる。

## 2.4 外海から侵入する波のエネルギーの推定

### 2.4.1 有限吹送距離における風波のスペクトル、および風波の推算式

風波のスペクトルのピークに対応する周波数  $f_p$  よりも高周波側の一部にはある種の普遍平衡領域が存在し、この領域では周波数スペクトル  $S(f)$  は (9) 式のように  $f^{-5}$  の関数で近似できることが、Phillips により次元考察により導かれた。しかしながら、光易らは  $\alpha$  は普遍定数ではなく、無次元吹送距離 ( $=gF/u_*^3$ , ここに  $g$  は重力加速度,  $F$  は吹送距離,  $u_*$  は摩擦速度である) の関数であるとして博多湾での実測値を参考にして次式を提案した。

$$\alpha = 0.589(gF/u_*^3)^{-0.308} \quad (22)$$

光易らは Burling のデータに基づいて低周波側の式についても提案しており、それぞれの式を当該周波数領域で積分することにより風波の波高あるいはエネルギーを算定する風波の推算式を得ることができるはずであるが、低周波側に対する提案式は容易に積分できる形となっていないため、スペクトル型を決定するのに使用した基礎データを直接利用することにより得られた次式を風波の推算式として提案している。すなわち、

$$g\sqrt{m_0}/u_*^2 = 1.31 \times 10^{-2}(gF/u_*^3)^{0.504} \quad (23)$$

### 2.4.2 外海から侵入する波のエネルギーの推定法

大阪湾を閉海域であると考え、大阪湾で発生する

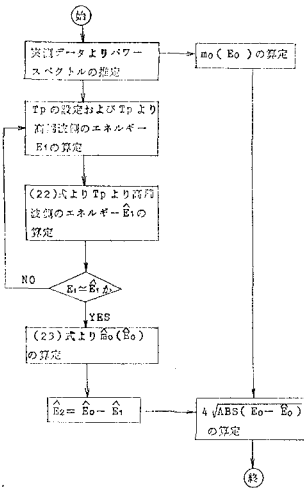


図-1 大阪湾への侵入波のエネルギーの推定フローチャート

が、大阪海内で発生する高波を考える場合ほとんどのケースはほぼ定常状態に達している可能性を有しているものと考えられる。また、本稿において対象とした高波時における風の時間変化を調べると、特に有義波高が1m以上の連続期間においては風向の変化はほとんどなく、またスペクトル型については高周波側の勾配は(9)式で良く近似できることが事前の調査により確認されたので、以上のことを前提として図-1に示すような手順により湾内で発生するうねりおよび外海から侵入するエネルギーの推定を試みることとした。

### 3. 調査結果および考察

#### 3.1 波浪の統計量について

ここで対象としたデータは、MT局において取得された異常波浪時の記録の内、 $\eta_{rms} \geq 25$  cm以上のものであり、さらに電気的あるいは機械的なノイズの混入による影響を避けるためデータ長100秒以下のもの、および $\beta_2 > 10$ のデータについてはあらかじめ計算の対象から除外した。スペクトル計算にはFFT法が用いられている。

このようにして得られた各種の統計量の平均値および標準偏差の一覧表を表-1に示す。これによると、平均値のサンプリング間隔による変動は $T_{01}$ ,  $T_{02}$ ,  $T_{-10}$ ,  $T_p$ などのスペクトルから得られる周期パラメータ,  $T_{1/3}$ ,  $T_z$ ,  $T_{R1}$ などの波形記録から直接得られる周期パラメータ,

波はfetch-limitedであると考えられ、Savilleによる有効フエッチの考え方を考慮して各風向に対して適用すると、いずれも二十数km以下となる。今、仮りに吹送距離を25kmと設定し、S.M.B.法で用いられる風波の予知曲線より定常状態となるのに要する吹送時間を推定すると、2.5 ( $U_{10}=20$  m/s)~3.5 ( $U_{10}=10$  m/s)時間となる。した

および水位記録から得られる $\eta_{rms}$ ,  $\beta_2$ などで比較的小さく、一方 $T_{24}$ ,  $T_0$ ,  $T_{-20}$ ,  $\varepsilon_T$ ,  $\nu_T$ ,  $T_X$ などで比較的大きくなっている。このうち特に $T_0$ で大きい。しかしながら、これらの比および標準偏差の変動は資料数および対象とした資料そのものの違いによるところが大きいので参考にとどめる。表-2には各パラメータ間の比およびその標準偏差, 相関係数, および回帰関係を示している。

Riceの理論の成立を仮定して得られる推定値 $T_{p1}$ ,  $T_{R1}$ ,  $\nu_T$ のそれぞれ $T_p$ ,  $T_{01}$ ,  $\nu_S$ に対する関係をみると、 $T_{p1}/T_p$ の値はサンプリング間隔が大きくなるほど小さくなり、0.5秒では約1.00と平均的に非常に良い対応を示し、比の標準偏差も0.5秒で最小となっている。この傾向は、 $\nu_S/\nu_T$ ,  $T_{R1}/T_{01}$ の場合についても同様である。一方これらの算定の基礎となったRiceの理論の成立については、 $T_z/T_{02}$ の値はサンプリング間隔が大きくなるにつれて大きくなり、サンプリング間隔0.5秒で約1.05と比較的よく成立している。しかしながら、 $T_0/T_{24}$ の値は1.18~1.25でかなりばらついており、Riceの理論は成立していない。比の標準偏差については $T_z/T_{02}$ ,  $T_0/T_{24}$ 共0.5秒でもっとも小さく、相関係数も0.5秒で最大となっている。この結果は特に $T_z/T_{02}$ の値については先の報告<sup>1)</sup>(太平洋, 日本海, 東シナ海の観測地点を対象)における値とほぼ同等であるが、 $T_0/T_{24}$ の値については本稿における値の方が小さくなっている。このことは、何らかの長周期波の混入による短い波との相互作用のような非線型効果による影響を示唆しているように思われる。

$T_p$ に対する各周期パラメータの値は、 $T_{p1}$ に対する

表-1 各種統計量の平均値および標準偏差  
( $T_{-10}$ ,  $T_{-20}$  はそれぞれ  $m_{-1}/m_0$ ,  $\sqrt{m_{-2}/m_0}$  を意味する)

| 変数名<br>X         | 0.2 秒 (N=92) |         | 0.3 秒 (N=94) |         | 0.4 秒 (N=91) |         | 0.5 秒 (N=87) |         |
|------------------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|
|                  | AVE (X)      | STD (X) | AVE (X)      | STD (X) | AVE (X)      | STD (X) | AVE (X)      | STD (X) |
| $T_{01}$         | 3.79504      | 0.30792 | 3.80639      | 0.29565 | 3.80713      | 0.30906 | 3.81102      | 0.30452 |
| $T_{02}$         | 3.53739      | 0.28034 | 3.55987      | 0.26764 | 3.56421      | 0.27906 | 3.57787      | 0.27318 |
| $T_{24}$         | 2.15642      | 0.20307 | 2.35355      | 0.14093 | 2.44453      | 0.15661 | 2.53646      | 0.14494 |
| $T_{-10}$        | 4.24542      | 0.36334 | 4.29562      | 0.34798 | 4.25414      | 0.36805 | 4.26905      | 0.36007 |
| $T_{-20}$        | 4.83634      | 0.48987 | 5.34873      | 0.71179 | 4.83753      | 0.49105 | 5.06158      | 0.54776 |
| $T_z$            | 3.66739      | 0.33084 | 3.69357      | 0.31904 | 3.72564      | 0.32684 | 3.76860      | 0.33779 |
| $T_0$            | 2.67814      | 0.20407 | 2.78136      | 0.18061 | 2.90728      | 0.20381 | 3.04528      | 0.20300 |
| $\eta_{rms}$     | 0.33285      | 0.05860 | 0.33171      | 0.05614 | 0.33285      | 0.05810 | 0.33179      | 0.05719 |
| $\sqrt{\beta_1}$ | 0.19189      | 0.10602 | 0.19597      | 0.08213 | 0.19279      | 0.09968 | 0.19815      | 0.07964 |
| $\beta_2$        | 3.16119      | 0.61193 | 3.14775      | 0.43338 | 3.15519      | 0.51019 | 3.13361      | 0.32432 |
| $\varepsilon_S$  | 0.79014      | 0.03193 | 0.74871      | 0.02045 | 0.72593      | 0.02303 | 0.70336      | 0.02210 |
| $\varepsilon_T$  | 0.67910      | 0.04010 | 0.65389      | 0.03814 | 0.62022      | 0.04658 | 0.58302      | 0.04856 |
| $\nu_S$          | 0.38738      | 0.02977 | 0.37736      | 0.02646 | 0.37412      | 0.02726 | 0.36541      | 0.02527 |
| $\nu_T$          | 0.44781      | 0.04661 | 0.41939      | 0.04087 | 0.38606      | 0.04464 | 0.35198      | 0.04360 |
| $T_p$            | 4.55842      | 0.42787 | 4.60006      | 0.51085 | 4.57570      | 0.44353 | 4.59804      | 0.50617 |
| $T_{p1}$         | 5.08266      | 0.76686 | 4.90249      | 0.68468 | 4.73410      | 0.65068 | 4.59728      | 0.62553 |
| $T_{R1}$         | 4.02476      | 0.40943 | 4.01109      | 0.39284 | 3.99985      | 0.39462 | 4.00167      | 0.43340 |
| $Q_p$            | 2.65280      | 0.37365 | 2.87902      | 0.49812 | 2.63323      | 0.38684 | 2.77058      | 0.42900 |
| $T_{1/3}$        | 4.22275      | 0.35758 | 4.24307      | 0.36420 | 4.24190      | 0.37110 | 4.27536      | 0.41500 |
| $T_{1/10}$       | 4.20493      | 0.38290 | 4.25055      | 0.40577 | 4.24124      | 0.39922 | 4.33223      | 0.49586 |
| $T_X$            | 4.21795      | 0.50300 | 4.18554      | 0.48821 | 4.38889      | 0.88722 | 4.74074      | 1.74291 |

表-2 各種統計量間の相関関係

| 変数名               |                   | 0.2 秒 (N=92)           |                        |                        |          |         |                        | 0.3 秒 (N=94)           |                        |          |         |                        |                        | 0.4 秒 (N=91)           |          |         |                        |                        |                        | 0.5 秒 (N=87) |         |  |  |  |  |
|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|---------|--|--|--|--|
| X                 | Y                 | AVE<br>( $\bar{X}/Y$ ) | STD<br>( $\bar{X}/Y$ ) | COR<br>( $\bar{X}/Y$ ) | 切 片      | 回帰係数    | AVE<br>( $\bar{X}/Y$ ) | STD<br>( $\bar{X}/Y$ ) | COR<br>( $\bar{X}/Y$ ) | 切 片      | 回帰係数    | AVE<br>( $\bar{X}/Y$ ) | STD<br>( $\bar{X}/Y$ ) | COR<br>( $\bar{X}/Y$ ) | 切 片      | 回帰係数    | AVE<br>( $\bar{X}/Y$ ) | STD<br>( $\bar{X}/Y$ ) | COR<br>( $\bar{X}/Y$ ) | 切 片          | 回帰係数    |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>p</sub>    | 0.934                  | 0.940                  | 0.93629                | -0.91665 | 1.07660 | 0.927                  | 0.955                  | 0.91339                | -0.39141 | 1.17523 | 0.932                  | 0.941                  | 0.93696                | 0.95764  | 1.06156 | 0.935                  | 0.957                  | 0.89551                | 0.33954      | 0.99331 |  |  |  |  |
| T <sub>1/10</sub> | T <sub>p</sub>    | 0.929                  | 0.946                  | 0.91825                | 0.91125  | 0.93552 | 0.928                  | 0.960                  | 0.90821                | 0.14599  | 1.04716 | 0.930                  | 0.947                  | 0.92433                | 0.95901  | 0.94620 | 0.946                  | 0.960                  | 0.87929                | 1.11152      | 0.80230 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>p1</sub>   | 0.932                  | 0.976                  | 0.84542                | 1.96180  | 0.90719 | 0.914                  | 0.991                  | 0.79679                | 1.82222  | 0.66073 | 0.959                  | 0.167                  | 0.67904                | 3.51945  | 0.25319 | 1.019                  | 0.329                  | 0.56319                | 4.13140      | 0.99109 |  |  |  |  |
| T <sub>1/10</sub> | T <sub>p1</sub>   | 1.119                  | 0.078                  | 0.85963                | 2.43703  | 0.41098 | 1.061                  | 0.096                  | 0.86673                | 1.83223  | 0.55395 | 1.035                  | 0.082                  | 0.88863                | 2.02193  | 0.35663 | 1.001                  | 0.082                  | 0.86037                | 1.74704      | 0.61798 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>z</sub>    | 0.938                  | 0.917                  | 0.91447                | 0.31059  | 0.99496 | 0.939                  | 0.966                  | 0.88299                | -0.26183 | 1.13169 | 0.935                  | 0.947                  | 0.91993                | 0.21522  | 1.02159 | 0.938                  | 0.960                  | 0.90134                | -0.40759     | 1.16641 |  |  |  |  |
| T <sub>1/10</sub> | T <sub>z</sub>    | 1.065                  | 0.997                  | 0.75136                | 2.17257  | 0.68688 | 1.166                  | 0.187                  | 0.46598                | 3.76410  | 0.15381 | 1.066                  | 0.099                  | 0.74411                | 2.09701  | 0.50592 | 1.128                  | 0.149                  | 0.59201                | 3.04131      | 0.29925 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>p</sub>    | 0.839                  | 0.939                  | 0.91463                | 0.08317  | 1.17217 | 0.833                  | 0.949                  | 0.90611                | -0.78147 | 1.41202 | 0.837                  | 0.940                  | 0.91925                | -0.02708 | 1.20514 | 0.833                  | 0.946                  | 0.90882                | -0.67361     | 1.38263 |  |  |  |  |
| T <sub>02</sub>   | T <sub>p</sub>    | 0.783                  | 0.939                  | 0.85992                | 0.16553  | 1.23405 | 0.780                  | 0.947                  | 0.89192                | -0.80654 | 1.51626 | 0.784                  | 0.949                  | 0.90209                | -0.00936 | 1.28197 | 0.782                  | 0.945                  | 0.89357                | -0.58493     | 1.47682 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.478                  | 0.945                  | 0.60161                | 2.28593  | 0.76845 | 0.517                  | 0.940                  | 0.78440                | -0.78894 | 2.28299 | 0.539                  | 0.937                  | 0.77378                | 0.46439  | 1.67350 | 0.556                  | 0.939                  | 0.79922                | -0.87643     | 2.15903 |  |  |  |  |
| T <sub>02</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.810                  | 0.944                  | 0.88628                | 0.77168  | 1.02501 | 0.809                  | 0.951                  | 0.87069                | 0.07313  | 1.22211 | 0.818                  | 0.945                  | 0.88565                | 0.50822  | 1.05839 | 0.823                  | 0.951                  | 0.86873                | 0.30640      | 1.13788 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>z</sub>    | 0.593                  | 0.941                  | 0.76678                | 1.26898  | 1.21743 | 0.613                  | 0.949                  | 0.75137                | 0.27812  | 1.54230 | 0.640                  | 0.946                  | 0.75133                | 1.00662  | 1.22116 | 0.667                  | 0.949                  | 0.77628                | 0.11596      | 1.47114 |  |  |  |  |
| T <sub>1/10</sub> | T <sub>z</sub>    | 0.841                  | 0.972                  | 0.91485                | -2.72230 | 1.61812 | 0.875                  | 0.960                  | 0.94347                | -2.19451 | 1.67028 | 0.904                  | 0.962                  | 0.93894                | -1.93351 | 1.57163 | 0.937                  | 0.954                  | 0.94938                | -1.19264     | 1.35284 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.837                  | 0.977                  | 0.87276                | -1.44688 | 1.55298 | 0.876                  | 0.962                  | 0.92082                | -1.22711 | 1.44013 | 0.903                  | 0.966                  | 0.90862                | -0.97999 | 1.34793 | 0.948                  | 0.970                  | 0.89026                | 0.27334      | 0.99663 |  |  |  |  |
| T <sub>02</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.839                  | 0.990                  | 0.81403                | 0.80072  | 1.01220 | 0.863                  | 0.993                  | 0.79019                | 1.25771  | 0.86561 | 0.930                  | 1.02                   | 0.66389                | 3.26467  | 0.33144 | 1.015                  | 0.285                  | 0.70458                | 3.74140      | 0.17831 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>z</sub>    | 0.844                  | 0.970                  | 0.91901                | -2.57701 | 1.80665 | 0.886                  | 0.964                  | 0.92773                | -2.24851 | 1.66412 | 0.907                  | 0.961                  | 0.94150                | -1.97601 | 1.57741 | 0.949                  | 0.961                  | 0.93774                | -1.99598     | 1.52992 |  |  |  |  |
| T <sub>1/10</sub> | T <sub>z</sub>    | 0.999                  | 0.111                  | 0.76547                | 0.68323  | 0.91199 | 1.100                  | 0.173                  | 0.54321                | 3.36293  | 0.28407 | 1.035                  | 0.112                  | 0.77028                | 0.78558  | 0.81258 | 1.132                  | 0.155                  | 0.59999                | 2.67084      | 0.57109 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.756                  | 0.965                  | 0.91143                | -2.85601 | 2.09285 | 0.786                  | 0.955                  | 0.94374                | -2.87620 | 2.04038 | 0.812                  | 0.955                  | 0.94562                | -2.42263 | 1.88088 | 0.836                  | 0.951                  | 0.95754                | -2.48413     | 1.85980 |  |  |  |  |
| T <sub>02</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.705                  | 0.964                  | 0.88958                | -2.65340 | 2.18758 | 0.736                  | 0.954                  | 0.93261                | -2.97426 | 2.20842 | 0.761                  | 0.955                  | 0.93413                | -2.69108 | 2.02700 | 0.781                  | 0.954                  | 0.94882                | -2.61053     | 2.01771 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>z</sub>    | 0.431                  | 0.959                  | 0.53362                | 2.72439  | 1.88706 | 0.489                  | 0.948                  | 0.79948                | -2.55832 | 3.15901 | 0.524                  | 0.951                  | 0.81091                | -1.89108 | 2.70979 | 0.558                  | 0.949                  | 0.85978                | -3.09003     | 3.02777 |  |  |  |  |
| T <sub>1/10</sub> | T <sub>z</sub>    | 0.728                  | 0.952                  | 0.91092                | -2.52942 | 2.07849 | 0.763                  | 0.945                  | 0.96592                | -2.52690 | 2.06531 | 0.793                  | 0.941                  | 0.96461                | -2.19301 | 1.86058 | 0.824                  | 0.940                  | 0.97249                | -1.94593     | 1.73856 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>p1</sub>   | 0.535                  | 0.965                  | 0.64833                | 0.87189  | 1.50975 | 0.580                  | 0.960                  | 0.75237                | -0.87481 | 2.05988 | 0.622                  | 0.964                  | 0.74704                | -0.44719 | 1.77981 | 0.686                  | 0.960                  | 0.81680                | -1.40630     | 1.97365 |  |  |  |  |
| ν <sub>S</sub>    | ν <sub>T</sub>    | 0.871                  | 0.977                  | 0.74708                | 0.48433  | 0.93088 | 0.912                  | 0.981                  | 0.74410                | 0.06912  | 0.92085 | 0.979                  | 0.103                  | 0.73648                | 0.93694  | 0.93449 | 1.053                  | 0.102                  | 0.76099                | 0.90344      | 0.92220 |  |  |  |  |
| ε <sub>T</sub>    | ε <sub>T</sub>    | 1.168                  | 0.963                  | 0.69063                | 0.18836  | 0.62035 | 1.154                  | 0.964                  | 0.75192                | -1.59701 | 1.08208 | 1.177                  | 0.982                  | 0.75731                | -2.85788 | 1.20898 | 1.212                  | 0.980                  | 0.82059                | -0.45565     | 1.47864 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>1/10</sub> | 1.063                  | 0.969                  | 0.89711                | 1.65316  | 0.60334 | 0.986                  | 0.977                  | 0.82869                | 1.72299  | 0.60172 | 1.030                  | 0.164                  | 0.74133                | 3.11750  | 0.25313 | 1.073                  | 0.391                  | 0.73565                | 3.59368      | 0.15454 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>1/10</sub> | 0.995                  | 0.933                  | 0.96258                | 0.62676  | 0.85199 | 1.148                  | 0.932                  | 0.96697                | 0.64633  | 0.84634 | 0.999                  | 0.933                  | 0.96614                | 0.61614  | 0.85543 | 1.012                  | 0.944                  | 0.85717                | 0.95045      | 0.16765 |  |  |  |  |
| T <sub>1/3</sub>  | T <sub>z</sub>    | 1.155                  | 0.943                  | 0.91820                | 0.69551  | 0.84565 | 1.037                  | 0.939                  | 0.96093                | 0.27884  | 0.80574 | 1.141                  | 0.944                  | 0.94083                | 0.33111  | 0.73922 | 1.137                  | 0.940                  | 0.96135                | 0.51386      | 0.75924 |  |  |  |  |
| T <sub>02</sub>   | T <sub>z</sub>    | 1.035                  | 0.932                  | 0.96766                | 0.60211  | 0.79523 | 1.037                  | 0.926                  | 0.97902                | 0.55883  | 0.81179 | 1.044                  | 0.929                  | 0.97402                | 0.52300  | 0.81666 | 1.053                  | 0.926                  | 0.98191                | 0.61335      | 0.78593 |  |  |  |  |
| T <sub>01</sub>   | T <sub>01</sub>   | 1.058                  | 0.941                  | 0.96248                | 0.99143  | 0.60550 | 1.052                  | 0.934                  | 0.97328                | 0.90670  | 0.72264 | 1.049                  | 0.935                  | 0.97102                | 0.83973  | 0.74188 | 1.048                  | 0.931                  | 0.97747                | 0.90991      | 0.72455 |  |  |  |  |
| T <sub>z</sub>    | T <sub>z</sub>    | 1.248                  | 0.108                  | 0.73902                | 0.50733  | 0.64186 | 1.186                  | 0.048                  | 0.89578                | 0.68893  | 0.59611 | 1.189                  | 0.052                  | 0.89598                | 0.62424  | 0.62665 | 1.200                  | 0.037                  | 0.94223                | 0.58139      | 0.64122 |  |  |  |  |

表-3 T<sub>p</sub> 及び T<sub>p1</sub> の T<sub>1/3</sub> に対する  
比のサンプリング間隔による  
変動

| サンプリング間隔 | T <sub>p</sub> /T <sub>1/3</sub> | T <sub>p1</sub> /T <sub>1/3</sub> |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0.2 s    | 1.071                            | 1.189                             |
| 0.3      | 1.078                            | 1.143                             |
| 0.4      | 1.073                            | 1.106                             |
| 0.5      | 1.070                            | 1.067                             |

表-4 T<sub>p</sub>, T<sub>p1</sub> の T<sub>01</sub>, T<sub>02</sub> に対する比のサンプリ  
ング間隔による変動

| サンプリング間隔 | T <sub>p</sub> /T <sub>01</sub> | T <sub>p1</sub> /T <sub>01</sub> | T <sub>p</sub> /T <sub>02</sub> | T <sub>p1</sub> /T <sub>02</sub> |
|----------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 0.2 s    | 1.192                           | 1.323                            | 1.278                           | 1.419                            |
| 0.3      | 1.201                           | 1.272                            | 1.283                           | 1.359                            |
| 0.4      | 1.195                           | 1.232                            | 1.276                           | 1.315                            |
| 0.5      | 1.200                           | 1.197                            | 1.279                           | 1.275                            |

値に比して全般的に小さく、標準偏差はほぼ同等であるが、T<sub>p</sub> に対するよりも T<sub>p1</sub> に対する相関性が高くなっており、したがって他の周期パラメータとの相関性を表現するには T<sub>p</sub> よりもむしろ T<sub>p1</sub> の方が妥当であると考えられる。

非常に重要な波浪諸元の一つである T<sub>1/3</sub> とスペクトルのピークに対応する周期の関係についてみるため、これらの比を表-3 に示す。これによると、(12) および (13) 式に示した値に比較して全般的に大きめであるが、サンプリング間隔 0.5 秒の場合の T<sub>p1</sub>/T<sub>1/3</sub> の値がそれにもっとも近くになっている。T<sub>p1</sub>/T<sub>1/3</sub> の値に大きな変動がみられるのは、主として T<sub>p1</sub> の変動に起因しているからである。

合田によると、ISSC スペクトルを用いた場合

$$\left. \begin{array}{l} T_p/T_{01}=1.295 \\ T_p/T_{02}=1.408 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

となる。本稿で得られた上記比の値をまとめると、表-4 に示すようになる。これらを比較すると、(24) 式の値は T<sub>p1</sub>/T<sub>01</sub>, T<sub>p1</sub>/T<sub>02</sub> のサンプリング間隔 0.2~0.3 秒の値に対応しており、T<sub>p</sub>/T<sub>01</sub>, T<sub>p</sub>/T<sub>02</sub> のいずれよりも大きい。またサンプリング間隔が 0.5 秒になると T<sub>p</sub>, T<sub>p1</sub> の差はほとんどなくなる。先に報告した算定結果はサンプリング間隔 0.5 秒で、T<sub>p</sub>/T<sub>01</sub>=1.318, T<sub>p</sub>/T<sub>02</sub>=

1.442, T<sub>p1</sub>/T<sub>01</sub>=1.232, T<sub>p1</sub>/T<sub>02</sub>=1.347 となっており、この方が (24) 式の値に近くなっている。このように本稿における比の値が小さく見積られているのは、表-1 にみるように ν<sub>S</sub> の値は (10) 式に示されるような標準スペクトルに対する値よりも小さい、すなわちややシャープなスペクトル形状をもつデータを対象としていたことによるものと思われる。

なお、(14)式に示すガンマ型スペクトルを用いて T<sub>-10</sub> を求めると T<sub>p1</sub> の算定式と同じものが得られる。しかしながら、スペクトルから得られる T<sub>-10</sub> は T<sub>p1</sub> に対してやや小さめであり、T<sub>1/3</sub> とほぼ同等の値となっている。

### 3.2 湾外よりの侵入波および湾内で発生するうねりのエネルギーの推定結果について

本稿で対象とした代表的な擾乱時の最盛時における湾外からの侵入波および湾内で発生するうねりのエネルギー（あるいはさらに発達するエネルギー量）の算定結果によると、S 系（S 系の風の卓越時）の場合に相当する 8 月 3 日、6 月 21 日、9 月 16 日の擾乱時には E<sub>2</sub>>E<sub>2</sub> であり、W 系の場合にはすべて E<sub>2</sub>>E<sub>2</sub> となっており、S 系の場合には湾外からの何らかの侵入波のあったことが予想される。顕著な異常波浪の出現した 2 月 28 日（春一番）、6 月 21 日（前線性）、8 月 3 日（台風）お

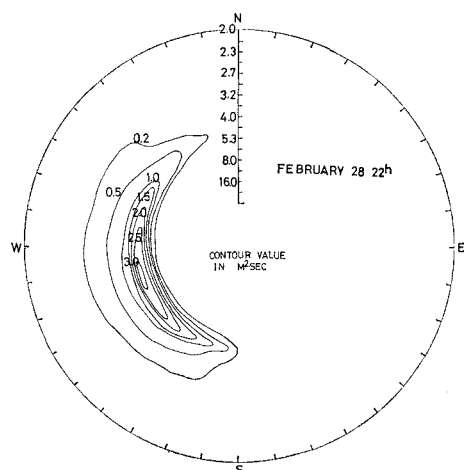


図-2 昭和53年2月28日22時のMT局での方向スペクトル

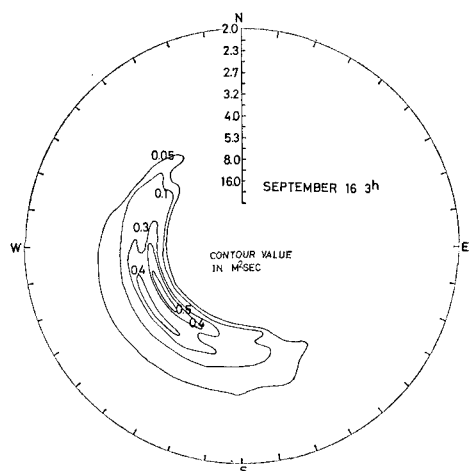


図-3 昭和53年9月16日3時のMT局での方向スペクトル

および9月16日(台風)について、算定結果を経時変化について述べると以下になる。なお、上記擾乱時の内W系、S系の代表的擾乱時であるそれぞれ2月28日22時および9月16日3時の方向スペクトルを図-2、3に示す。

2月28日の擾乱時には22時に最大(23時は欠測)の波高が得られ、この時には  $E_2 \approx \hat{E}_2$  となっており、W系の強風によりほぼ定常状態になっていたと考えられ、W~WSW方向に周期約5.5秒の卓越したエネルギー

がみられる。

6月21日にはもっとも波が発達した2時以外はおおむね  $E_2 > \hat{E}_2$  となっている。 $E_2 - \hat{E}_2$  ( $E_2 > \hat{E}_2$ ) の値のもっとも大きいのは1時の約60cmである。

S系の風がもっとも卓越した8月3日はいずれも  $E_2 > \hat{E}_2$  となっており、波高の最大時刻は9時であるが、 $E_2 - \hat{E}_2$  の量は8時に最大であり、約1.2mが得られている。なお8月3日は流速計のデータに異常がみられたので方向スペクトルは算定していない。

9月16日には、波高が最大となっているのは2時であり、その前後ではいずれも  $E_2 > \hat{E}_2$  となっている。 $E_2 - \hat{E}_2$  の最大は4時に得られており、約70cmとなっている。方向スペクトル図によると、方向は約240°(Nから時計方向)であるが、周期約8秒と5.3秒に二つのエネルギーピークがみられる。

以上のように、W系の擾乱の卓越時にはほとんど顕著な湾外からの侵入波のエネルギーはみられないが、S系の擾乱の卓越時には明らかに周期の異なる何らかの湾外からの侵入波のエネルギーが考えられる。そのエネルギーは有義波高約2mに対し1.2m(換算有義波高)に達する可能性がある。

#### 4. 結 語

以上、本研究では大阪湾で得られた資料を基に大阪湾における波浪の統計的性質ならびに湾外から侵入するエネルギー量の試算をおこなった。限られたデータ量の関係で十分な検討を加えることができなかったが、Riceの理論の成立を仮定して得られるパラメータの統計的有意性が明らかにされ、一方では大阪湾におけるS系、W系の擾乱時の湾内波浪の特性の差異が明らかにされた。

今後は、(16)式で仮定したガンマ型スペクトルおよび他の標準型スペクトルのナイキスト周波数でのカットによる推定パラメータの挙動を実測値との比較を基に検討してゆく必要があるとともに、データの蓄積に努めなければならない。

最後に、データの取得に尽力をいただいた運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所、ならびに関西新空港調査室の方々に深甚の謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 高橋智晴・広瀬宗一・佐々木徹也: スペクトル幅パラメータと波浪周期の関係, 港湾技研資料, No. 315, 1979.