

# 野島崎沖海域の波浪特性

小舟浩治\*・橋本典明\*・佐々木 弘\*\*

## 1. ま え が き

房総半島野島崎の南東沖海域は、北太平洋の重要な航路となっているが、昭和45年以来「ぼりばあ丸」「尾道丸」など十数隻の大型船が海難に遭遇しており、魔の海域と呼ばれている。この海域上では冬から春にかけて、前線を伴った低気圧が次々と発生しては急速に発達しながら東方へ移動し衰退するという変化の激しい気象状況となっている。そのため、通常海域では予想もつかないような特異な波浪が発生し、それが海難を引き起こしたのではないかと懸念されている。

この海域において頻発する海難を未然に防止する手法の開発を目的として、運輸省は気象庁、気象研究所、船舶技術研究所、港湾技術研究所の協力体制により、昭和57年から5か年計画で、同海域の波浪観測、波浪外力と船体構造の応答解析、実船試験、水理模型実験及び数値シミュレーション等を含む総合的調査研究を推進中である。

本研究はこれら一連の調査のうち、波浪特性（主として方向スペクトルに関する特性）について検討したものである。

## 2. 観 測 機 器

波浪観測には気象庁が洋上観測局として現在使用している円盤型ブイ（松下通信製、直径10m、自重45t）と同型のブイを使用し、波浪計測機器として、オランダのDatawell社製の船舶動揺計Hippy-120を搭載し、ブイの鉛直運動（Heave）加速度及び傾斜角（Pitch及びRoll）を測定した。Hippy-120の諸特性値は表-1に示すとおりである。この動揺計は寸法や重量が大きいこともあって、応答特性について動的な検定は十分に行なえなかったが、静的試験ではほぼ公称精度を満足していることを確かめた。なお円盤型ブイ本体の鉛直運動については、周期5～20秒の波に対して応答特性は良好であることが確かめられている<sup>1)</sup>。

波浪観測ブイは1983年10月に野島崎沖東方約850

表-1 動揺計（Hippy-120）の特性値

| 項 目      | 特 性 値                                                                                                                   |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 寸 法、重 量  | 円筒容器（直径66cm、高さ84cm）、120kg                                                                                               |
| 固 有 周 期  | 120秒（センサー取付安定板）                                                                                                         |
| 測定範囲（誤差） | 傾斜角 $\pm 90^\circ$ （1.7%以内）<br>鉛直加速度 $\pm 10\text{ m/s}^2$ （1.5%以下）<br>磁気コンパス $0^\circ\sim 360^\circ$ （ $\pm 5^\circ$ ） |
| 出 力      | $\pm 10\text{ V}$ 、2048ビット（フルスケール）                                                                                      |
| 応 答 特 性  | 鉛直加速度：0.067～1.0 Hz                                                                                                      |

km（東経147°、北緯32°、水深6000m）の地点に設置され、1984年6月に撤収されるまで、9ヶ月にわたって3時間毎に20分間の定時波浪計測を行なった。観測データは気象衛星ひまわり経由で伝送するため、伝送データ量の制約から、ブイ上のマイクロ・プロセッサにより一次処理を行なっている。各種伝送データのうち、波浪に関連するものは表-2に示す諸量である。

表-2 衛星経由伝送データ（波浪関連）

| 諸 元                       | 記号             | 測定範囲                   | 諸 元            | 記 号              | 測定範囲                |
|---------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------|---------------------|
| 風 向                       | $\theta_w$     | $0\sim 360^\circ$      | 最高波高           | $H_{\max}$       | $0\sim 20\text{ m}$ |
| 風 速                       | $U$            | $0\sim 120\text{ m/s}$ | 最高波周期          | $T_{\max}$       | $0\sim 20\text{ s}$ |
| 20波平均波高                   | $\bar{H}_{20}$ | $0\sim 20\text{ m}$    | 歪 度            | $\sqrt{\beta_1}$ | $\pm 5.00$          |
| 20波平均周期                   | $\bar{T}_{20}$ | $0\sim 20\text{ s}$    | 尖 度            | $\beta_2$        | $0\sim 10.0$        |
| ブイ方位                      |                | $0\sim 360^\circ$      | 平均波向           | $\bar{\theta}$   | $\pm 90^\circ$      |
| 有義波高<br>( $4\eta_{rms}$ ) | $H_s$          | $0\sim 20\text{ m}$    | 卓越波向           | $\theta_p$       | $\pm 45^\circ$      |
| 平均波高                      | $\bar{H}$      | $0\sim 20\text{ m}$    | 波 峰 長<br>パラメータ | $\gamma$         | $0\sim 1.0$         |
| 平均周期                      | $\bar{T}$      | $0\sim 20\text{ s}$    | 平均分散角          | $\theta_k$       | $0\sim 90^\circ$    |

## 3. 波向及び方向スペクトル形状パラメータ

ブイの鉛直変動速度 $\eta_t$ 及び傾斜角二成分 $\eta_x$ 、 $\eta_y$ の同時観測記録からクロス・スペクトルを求め、これを用いて波群の方向スペクトルを推定することも可能である<sup>2)</sup>。しかし、この方法ではクロス・スペクトルを多数の周波数成分について求めるため演算に時間を要し、また出力データ量も多くなる。そこで本調査においては、上記三測定量の共分散を用いて波向及び方向スペクトルの広がりを表わすパラメータを求めることにした。

まず波向はその定義により平均波向 $\bar{\theta}$ と卓越波向（主波向） $\theta_p$ が考えられ、方向スペクトル形状に関する指

\* 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

\*\* 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官

標として, Longuet-Higgins が提案した波峰長パラメータ (Long-crestedness)  $\gamma$  と合田が提案した平均分散角  $\theta_k$  がある。これら4つの量の定義や特性, 及び波動に係る測定量の共分散を求める手法については, 合田が文献2) で詳述している。以下これに基づいて概要を述べておく。

### (1) 平均波向 ( $\bar{\theta}$ )

ある波群の持つ方向スペクトル  $E(l, m)$  が, 波数に関する直交座標系において図-1に示す形状であると想定する。

座標原点  $O$  と方向スペクトルの重心  $G$  を結ぶ方向を波向と定義し, これを平均波向と呼ぶ。この平均波向  $\bar{\theta}$  は  $l$  軸及び  $m$  軸まわりの方向スペクトルの一次モーメントを用いて次式により定義される。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(M_{01}/M_{10}) \quad (1)$$

ここに,  $M_{01}$ ,  $M_{10}$  は次式で与えられる。

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(l, m) l^p m^q dl dm \quad (2)$$

さらに, 共分散の関数として  $\bar{\theta}$  は式(3)により求めることができる。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(\overline{\eta_x \eta_y} / \overline{\eta_x^2}) \quad (3)$$

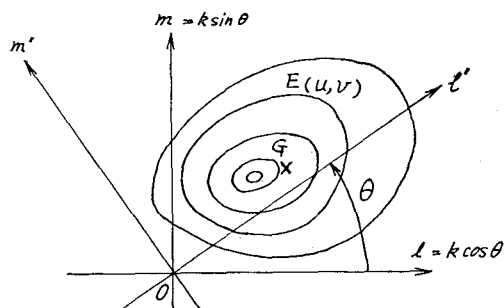


図-1 方向スペクトルの形状

### (2) 卓越波向 ( $\theta_p$ )

波数平面上で, 原点を通るある軸まわりの方向スペクトルの二次モーメントが最小となる方向, すなわちその軸に直角方向の波数の分散値が最小となる方向で, 式(4)により与えられる。

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\overline{\eta_x \eta_y}}{\overline{\eta_x^2} - \overline{\eta_y^2}} \right) \quad (4)$$

### (3) 平均分散角 ( $\theta_k$ )

方向スペクトル  $E(l, m)$  の重心  $(\bar{l}, \bar{m})$  と原点を結ぶ軸まわりの二次モーメント  $M_2(\bar{\theta})$  の関数として式(5)により定義する。

$$\theta_k = \tan^{-1}(r/\bar{k}), \quad (5)$$

ここに,

$$\begin{aligned} r^2/\bar{k}^2 &= M_2(\bar{\theta})/\bar{k}^2 M_{00} \\ &= \frac{M_{00}(M_{01}^2 M_{20} - 2M_{10} M_{01} M_{11} + M_{10}^2 M_{02})}{(M_{10}^2 + M_{01}^2)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$M_2(\theta) = M_{20} \sin^2 \theta - 2M_{11} \cos \theta \sin \theta + M_{02} \cos^2 \theta \quad (7)$$

$$\bar{k} = \sqrt{\bar{l}^2 + \bar{m}^2}.$$

なお式(5)における  $r$  は方向スペクトルの  $OG$  軸からの分散距離を表わしている。

共分散を用いると  $r/\bar{k}$  は次式のように与えられる。

$$\frac{r}{\bar{k}} = \frac{\sqrt{\overline{\eta_x^2}} \sqrt{(\overline{\eta_x \eta_y})^2 \overline{\eta_x^2} - 2\overline{\eta_x \eta_x} \overline{\eta_x \eta_y} \overline{\eta_y} + (\overline{\eta_x \eta_x})^2 \overline{\eta_y^2}}}{(\overline{\eta_x \eta_x})^2 + (\overline{\eta_x \eta_y})^2} \quad (8)$$

### (4) 波峰長パラメータ ( $\gamma$ )

原点を通る軸まわりの二次モーメント  $M_2(\theta)$  (式(7)) は  $\theta = \theta_p \pm n\pi$  で最小値,  $\theta = \theta_p \pm (2+1)\pi/2$  の時最大値をとる。この二次モーメントの最小値と最大値の比の関数として, 波峰長パラメータ  $\gamma$  は式(8)により与えられる。

$$\begin{aligned} \gamma &= \left\{ \frac{[M_2(\theta)]_{\min}}{[M_2(\theta)]_{\max}} \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \frac{(M_{20} + M_{02}) - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}}{(M_{20} + M_{02}) + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}} \right\}^{1/2} \\ &= \sqrt{\frac{\overline{\eta_x^2} + \overline{\eta_y^2} - \sqrt{(\overline{\eta_x^2} - \overline{\eta_y^2})^2 + 4(\overline{\eta_x \eta_y})^2}}{\overline{\eta_x^2} + \overline{\eta_y^2} + \sqrt{(\overline{\eta_x^2} - \overline{\eta_y^2})^2 + 4(\overline{\eta_x \eta_y})^2}}} \end{aligned} \quad (9)$$

波峰長パラメータ  $\gamma$  は, 規則波あるいは一次元不規則波の場合 0, 成分波が全方向に一樣に分布しているとき 1 となり, 一般には  $0 < \gamma < 1$  である。

なお, 上述のように  $\gamma$  は二次モーメントの最小値と最大値の比の関数として与えられるので, 例えばうねりと風波が角度  $\theta_D$  をなして来襲するような二方向性の波群については,  $\gamma$  は  $\theta_D$  が 90 度の時最大となり, 90 度以上開くと減少するという特性を持っている。

## 4. 観測結果

### (1) 観測波浪の統計

1983 年 10 月中旬から 1984 年 3 月までの観測値について, 総平均値及び標準偏差を求めた。その結果は表-3 に示すとおりである。

波形の Skewness と Kurtosis の平均値は, それぞれ 0, 3.0 に近い値となっており, 水位変動の非線型性は小さく, また波形記録におけるスパイク・ノイズも少ない正常な波形であると言える。

この期間の平均有義波高はで 3.35 m, 同期間の波浮港 (水深 50 m) における値 1.8 m, 常陸那珂港 (30 m) の 1.1 m に比べ 2~3 倍近い波高となっており, この海域では沿岸域よりかなり大きい波が常に発生していること

表-3 波浪の統計

| 諸 量              | 平均値 (標準偏差)      | 諸 量                     | 平均値 (標準偏差)      |
|------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| $H_s$            | 3.35 m (1.25 m) | $H_{\max}/H_s$          | 1.46 m (0.16 m) |
| $H_{\max}$       | 4.88 (1.91)     | $H_s/\bar{H}$           | 1.72 (0.09)     |
| $\bar{H}$        | 1.97 (0.77)     | $\bar{H}/\bar{H}_{20}$  | 0.93 (0.07)     |
| $\bar{H}_{20}$   | 2.12 (0.81)     | $H_{\max}/\bar{H}$      | 2.50 (0.30)     |
| $T_{\max}$       | 9.00 s (1.68 s) | $T_{\max}/\bar{T}$      | 1.23 s (0.17 s) |
| $\bar{T}$        | 7.31 (1.04)     | $\bar{T}/\bar{T}_{20}$  | 0.86 (0.10)     |
| $\bar{T}_{20}$   | 8.56 (1.16)     | $T_{\max}/\bar{T}_{20}$ | 1.06 (0.17)     |
| $\sqrt{\beta_1}$ | 0.044 (0.064)   | $\beta_1$               | 3.005 (0.230)   |

がわかる。ちなみに、1月と2月では有義波高が4mを越える日が月の半分近くを占めている。

一方、平均周期  $\bar{T}$  のこの期間中の平均値は7.3秒で、上記両港での値6.2~6.4秒に比べ1秒程度長い。こうした波高や周期の相違は、冬期には北西季節風が卓越していることを考慮すると、フェッチの長さの違いによるものと考えられる。

また、12月~2月の3か月間を対象として、発生有義波高の未超過確率を求め、上記両港のそれと共に正規確率紙上に図示したものが図-2である。図中○印で示した野島崎沖海域における確率分布形は、沿岸域における分布形状と比べ、傾きは異なるものの類似した傾向にあることがわかる。

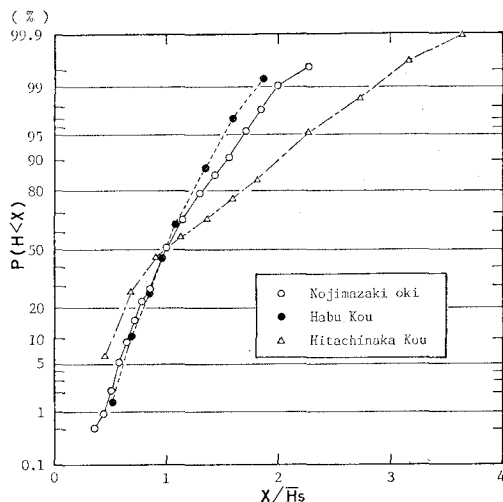


図-2 有義波高の未超過発生確率

波高に関する各種パラメータ間の関係を見ると、 $H_{\max}/H_s$  の平均値 1.46 は、沿岸域における値<sup>3)</sup> 1.55~1.77 に比べ小さめであり、 $H_s/\bar{H}$  (1.72) は沿岸域 (1.50~1.61) より大きめである。これは有義波高を  $4\gamma_{rms}$  として与えたため、zero up-cross 法で求められる有義波高より大きい値となったことによると考えられる。なお、深海域での一般的な関係として知られている  $H_s=3.8\gamma_{rms}$ <sup>3)</sup> を用

いると、表-3 の  $H_s$  は 5% 減少し、総平均値は 3.18 m となり、この値を使用すれば  $H_{\max}/H_s=1.53$ ,  $H_s/\bar{H}=1.63$  となり、上記沿岸域における比率とほぼ一致する。

## (2) 高波の発生状況

図-3 は有義波高が 8 m を越す高波の一例として、観測期間中の最大有義波高 (8.44 m) を記録した 2 月 18 日前後の、有義波高  $H_s$ 、風速  $U$ 、平均波向  $\bar{\theta}$ 、及び風向  $\theta_w$  の経時変化を示した図である。図中実線で示した有義波高及び平均波向の変化は、点線で示す風速及び風向の変化に追従していることがわかる。

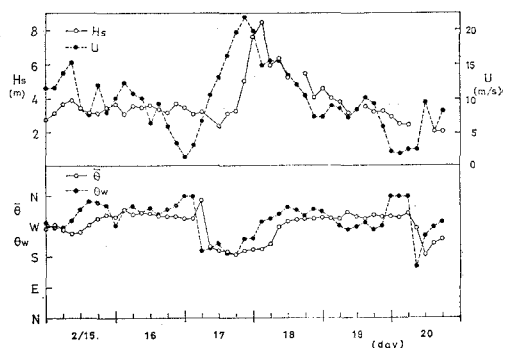


図-3 波高、波向、風速、風向の経時変化

一般に高波は前線を伴った低気圧が通過する時に発生しており、図-3 に見られるように風向が北西から南西に急変した直後、風速も 5~10 m/s から 15 m/s 以上に増大している。こうした風の変化に数時間遅れて波高も 12~15 時間の間に増大している。

このように、有義波高が大きい (4 m 以上) 高波時には、風速と波高、風向と波向がそれぞれ対応していること、また後述するように、この時の周波数スペクトルが一般に言われている風波のスペクトル形状に類似していることから、観測海域における高波の発生に対してはこの海域上の風の方が支配的であって、他の波源から到達するうねりの寄与は比較的小さいと考えられる。

図-4 は 2 月 18 日 3 時の波浪の周波数スペクトルを示している。図中 ● 印が Heave スペクトルの伝送値、実線は波形の極値 (山及び谷) を内挿して推定した波形のスペクトル形 (気象研究所提供) である。ピーク周波数は 0.08 Hz (周期 12 秒) 付近にあり、 $f=0.06\sim0.15$  Hz (周期 6.7~16.6 秒) の範囲にスペクトル密度の大半が集中している。図中の点線は式 (10) で与えられる Bretschneider-光易型スペクトル (有義波高として観測値 8.44 m, 周期はスペクトルのピーク周波数が等しくなるよう与えている) であるが、観測スペクトルはこのスペクトル形よりピーク付近の密度が大きい発達期の風波のスペクトル形<sup>4)</sup> となっている。

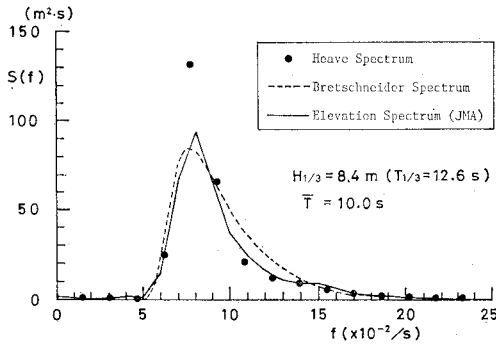


図-4 周波数スペクトル

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp[-1.08 (T_{1/3} f)^{-4}] \dots \dots \dots (10)$$

## (3) 方向スペクトル形状の推定

方向スペクトルを周波数スペクトル関数  $S(f)$  と方向分布関数  $G(f, \theta)$  の積として表現する方法が一般に用いられている。方向分布関数としては  $\cos^2 \theta$  型あるいは光易<sup>5)</sup>の提案によるもの(式(11))等がある。

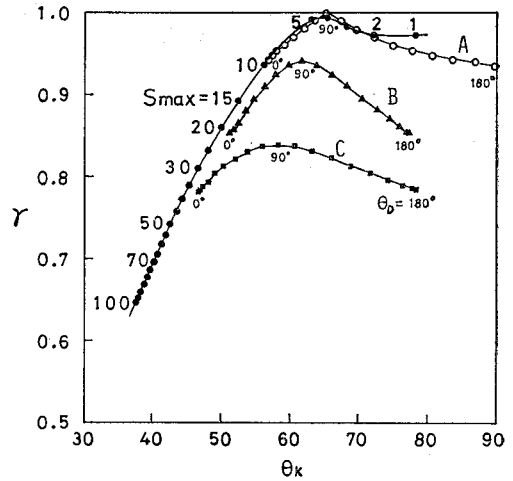
$$G(f, \theta) = G_0 \cos^2 S(\theta/2) \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $G_0$  は各々の周波数成分について方向関数  $G(f, \theta)$  の  $\theta$  に関する積分値が 1.0 となるように定める係数である。また  $S$  は周波数スペクトル密度がピークとなる周波数  $f_p$  のとき最大値  $S_{\max}$  をとり、ピーク周波数から外れるにつれて次第に減少するが、 $S$  の値はその最大値  $S_{\max}$  をパラメータとして式(12)により与えることができる<sup>6)</sup>。

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & : f \geq f_p \end{cases} \dots \dots \dots (12)$$

いま、周波数スペクトルとして Bretschneider-光易型(式(10))、方向分布関数として上記光易型分布関数を考えると、この方向スペクトルの平均分散角  $\theta_k$  及び波峯長パラメータ  $\gamma$  は、有義波周期と  $S_{\max}$  の値が与えられれば一義的に定まる。例えば有義波周期を 10 秒とすれば、 $\theta_k$  及び  $\gamma$  は  $S_{\max}$  のみの関数として与えられ、両者は図-5 の●印で示す関係にあることがわかる。

また、同様にして、それぞれが Bretschneider-光易型方向スペクトルを持つ二つの波群が、方向差  $\theta_D$  の角度で同時に来襲する場合を想定し、このときの  $\theta_k$  と  $\gamma$  の関係を数値積分により求めることができる。図-5 の曲線 A は有義波高が等しい二つの風波 ( $S_{\max}=10$ ) が重なった場合、B は風波 ( $S_{\max}=10$ ) と有義波高がこの風波の 1/2 のうねり ( $S_{\max}=100$ ) が重なった場合、C は等しい有義波高の風波 ( $S_{\max}=10$ ) とうねり ( $S_{\max}=100$ ) が重なった場合について、方向差  $\theta_D$  を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで変化させたときの、 $\gamma$  と  $\theta_k$  の変化を示している。なお、数値計算においては、いずれの波群も有義波周期は 10

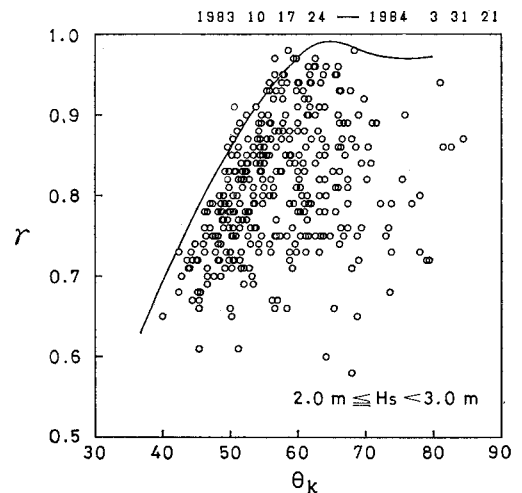
図-5  $\theta_k$  と  $\gamma$  の関係 (光易型方向分布関数)

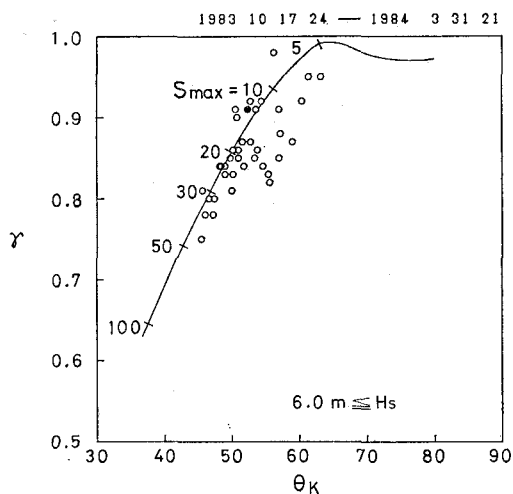
秒としている。

図-5 により、二つの波群が重なった二方向性波浪状況に対する  $\theta_k$  と  $\gamma$  の関係は、二つの波群のそれぞれの  $S_{\max}$  の相違や有義波高の違いにより種々変化するが、いずれの場合も方向差  $\theta_D$  が増大するに従い、図中●印で示す一方向性波群に対する曲線より右側に移動してゆくことがわかる。またこの際波峯長パラメータ  $\gamma$  は  $\theta_D = 90^\circ$  のとき最大値を示す。

一方、ブイ運動三成分の観測結果から求めた  $\gamma$  と  $\theta_k$  の関係を、有義波高の階級別に図-5 にならって表示したものが図-6 及び図-7 である。

波高が比較的小さい  $H_s = 2 \sim 3$  m の場合(図-6)には、図中実線で示した一方向性波群に対する  $\theta_k$ - $\gamma$  曲線を包絡線として、観測値はその右側にばらついている。観測値の約半数は曲線付近に現われているが、曲線から

図-6  $\theta_k$  と  $\gamma$  の関係 ( $2\text{ m} < H_s < 3\text{ m}$ )

図-7  $\theta_k$  と  $\gamma$  の関係 ( $H_s < 6 \text{ m}$ )

かなり離れた位置にも多数現われている。後者の場合には、図-5 の二方向性波群に対する曲線から推測すると、観測波群は遠くの波源から到達したうねりと、その場の風で発生した風波が重なり合った複雑な方向スペクトルを持っているものと考えられる。

このような観測値のばらつきも、有義波高が大きくなるにつれてその範囲は小さくなり、特に有義波高が 6 m を越える場合 (図-7) には、一方向性に対する曲線に近い範囲に集まっている。このばらつきの範囲と、図-5 の曲線 B, C とを比較すると、二方向性波浪と仮定しても、両波群の方向差は 60~90° 以下と思われる。

ちなみに、最大有義波高を記録した 2 月 18 日 3 時の  $\theta_k$  と  $\gamma$  の関係は 図-7 中 ●印の位置であり、光易型方向分布関数において  $S_{\max} = 12 \sim 13$  としたときの値に相当する。

## 5. 結 論

野島崎沖海域においては、冬から春にかけて常時義波高 2~3 m 以上の波が発生している。これは沿岸域の 2~3 倍の波高である。しかし、波群の特性値 ( $H_{\max}/H_s$ ,  $H_s/\bar{H}$  等) 及び発生波高の未超過確率等は、沿岸域で見られる波群のものと類似した傾向にある。

また、高波の発達や減衰は、観測地点における風の場の発達や減衰と関連性が強く、海難が発生する恐れのある高波 (有義波高 6 m 以上) の波浪は、風速 20 m/s 以上の強風時に発生している。このときの波群が一方向性の方向スペクトルを有すると仮定すれば、光易型方向分布関数において  $S_{\max} = 10$  程度とした方向分布に相当する。また二方向性と仮定しても、二つの波群の方向差は比較的小さく 90° 程度以下と推察される。

最後に、本研究における波浪観測ブイによる観測は気象庁が実施したものであることを記し、伝送データを提供頂いたことに対し、改めて御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉： 厚円盤型ブイの波浪中応答特性，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 392~396, 1978.
- 2) 合田良実： 共分散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 2 号，pp. 53~92, 1981. 9.
- 3) 高橋智晴ほか： 波浪に関する拠点観測 10 年統計 (昭和 45~54 年)，港湾技研資料，No. 401, 711 p., 1981.
- 4) 広瀬宗一・立花祐二・菅原一晃： 日本沿岸の波浪のスペクトル形について，港湾技術研究所報告，第 22 巻第 3 号，pp. 83~124, 1983. 9.
- 5) 光易 恒ほか： Observation of the Directional Spectrum of Ocean Waves using a Cloverleaf Buoy, J. Phys. Oceanography, Vol. 5, pp. 750~769, 1975.
- 6) 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，港湾技研資料，No. 230, 45 p., 1981.