

スペクトル法による四国沿岸及び大阪湾内での 波浪推算について

小野川繁澄*・布施谷 寛**・佐藤孝夫***・井上篤次郎****

1. 緒 言

波浪推算法は主に不規則な波を単一波として扱う有義波法と各成分波に分けスペクトル的に扱うスペクトル法に大別されるが、波の基本的な性質を良く示し、時々刻々と変化する風場に良く対処しうる後者の方が理論的には優れている。スペクトル法は PNJ 法が最初で、その後風波の発生・発達理論等の発展とともに、波浪スペクトルに関するエネルギー平衡方程式を風場を与えて数値的に解く種々の数値モデルが開発されており、最近では井上モデル¹⁾の流れを汲む SOWM、磯崎・宇治モデル^{2),3)}及び Gelci らによる DSA 等が実用段階にある。

本研究ではこのスペクトル法を用いて、有義波法⁴⁾では両者を同時に推算することが難しい風波と友ヶ島水道を経て外洋から侵入するうねりが共存する大阪湾⁵⁾での波浪推算を実行しようとするものである。このため、太平洋～四国沿岸～大阪湾を対象領域とした連続計算が可能な波浪推算プログラムを井上モデルに基づいて開発し、これを沿岸での実測波浪記録が多く取得されている

最近の気象擾乱に適用し、実測値との比較を行い本プログラムの推算精度を検討した。また、Myers の式等を用いた簡便な設定法により風場を与えた場合の推算精度についても検討を行なった。ここにその成果について報告する。

2. 波浪推算モデル

井上モデルでは Hasselmann によるエネルギー平衡方程式のうちエネルギーの授受に関する項として、Phillips と Miles による風波の発生・発達に関する項及び砕波によるエネルギー消散に関する項を考慮し、基本式として次式を提案している。

$$\frac{dS}{dt} = -C_g \cdot \nabla S + (A + BS) \left\{ 1 - \left(\frac{S}{S_\infty} \right)^2 \right\} \dots (1)$$

ここで、 S は時間 t 、位置 $\vec{x}$ での周波数 f の成分波の 1 次元スペクトル $S(f, t, \vec{x})$ 、 C_g は成分波の群速度、 A は Phillips の共振理論における直線的成長率、 B は Miles の不安定理論における指数関数的成長率であり毎時間当りの値は次式で示される。

$$A(f, u) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{3.54 \times 10^{-11} \times \omega^{5.25} u^{2.25} d\theta}{[(1/4)(\omega/u)^2 + (k \sin \theta)^2][(1/9)(\omega/u)^2 + (k \cos \theta - \omega/u)^2]} \dots (2)$$

$$B(f, u_*) = \{5 \exp[-7000\{(u_*/c) - 0.031\}^2] + 2612(u_*/c)^2 \exp[-0.0004(c/u_*)^2]\} \cdot f \dots (3)$$

ここで、 u は海上 19.5m での風速、 ω は角周波数、 c は成分波の波速、 u_* は摩擦速度、 k は波数、 θ は風向と波向とのなす角度である。また、 S_∞ は成熟波スペクトルであり次式の Pierson-Moskowitz 型を用いた。

$$S_\infty(\omega, u) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp[-\beta(g/u\omega)^4] \dots (4)$$

ここで、 $\alpha = 8.10 \times 10^{-8}$ 、 $\beta = 0.74$ 、 g は重力加速度である。

式 (1) はこのままでは解が求まらないので、空間的な波の伝播を表す右辺第 1 項の移流項は別途処理することで除き、時間 t に関する項のみの式に実用上無視しうる項を加えて積分し、次式の近似解を求めた。

$$S(f, t) = \frac{A[\exp\{B(t+t_0)\} - 1]}{B} \times \left[1 + \left\{ \frac{A[\exp\{B(t-t_0)\} - 1]}{BS_\infty} \right\}^2 \right]^{-1/2} \dots (5)$$

$$t_0 = \frac{1}{B} \ln \left[1 + \frac{BS_0}{A\{1 - (S_0/S_\infty)^2\}^{-1/2}} \right] \dots (6)$$

ここで、 S_0 はタイムステップ t_0 での初期スペクトルである。実際の波は全ての方向に伝播していくため、上で求めた 1 次元スペクトルにさらに方向分布関数 $G(\theta)$ を乗じて 2 次元スペクトル $S(f, \theta, t)$ とすることが必要である。方向分布関数としては余弦自乗則を適用し、 $G(\theta) = 2/\pi \cdot \cos^2 \theta$ ($|\theta| \leq \pi/2$) とした。

さらに、一般に波が伝播する途中で逆風を受けると急速にエネルギーを失うことが知られているので、次式で

* 正会員 運輸省第三港湾建設局次長
** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所次長
*** 正会員 工修 運輸省港湾局建設課技術基準第一係長(前神戸調査設計事務所工事専門官)
**** 理博 神戸商船大学教授

逆風による減衰効果を考慮した。

$$S_d(f, \theta_i) = S_0(f, \theta_i) [\exp \{-c_1 \sqrt{S_w} f^4\}]^{K(\theta)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 S_0 、 S_d は減衰前・後のスペクトル、 $S_w = \sum S(f_i, \theta_i)$ 、 $c_1 = 56.4 \times \Delta t$ (Δt は計算時間間隔)、 $K(\theta)$ は θ ごとに変わる定数である。

3. 波浪推算プログラム

(1) 計算方法

1 タイムステップの計算は、まず与えられた風場の下で全格子点における風波スペクトルの時間的な成長計算を式 (1) で、減衰計算を式 (7) で行ない、次に階接する格子点への波の伝播を計算した。この一連の計算を広領域の終了時刻まで繰り返し、順次中領域から狭領域の計算へと進めていき 1 ジョブの計算を終了した。

a) 風波スペクトルの計算

計算領域は、広領域は南方洋上を対象にしてランペルト共形図上に、中・狭領域は漸長図上に 図-1 のように

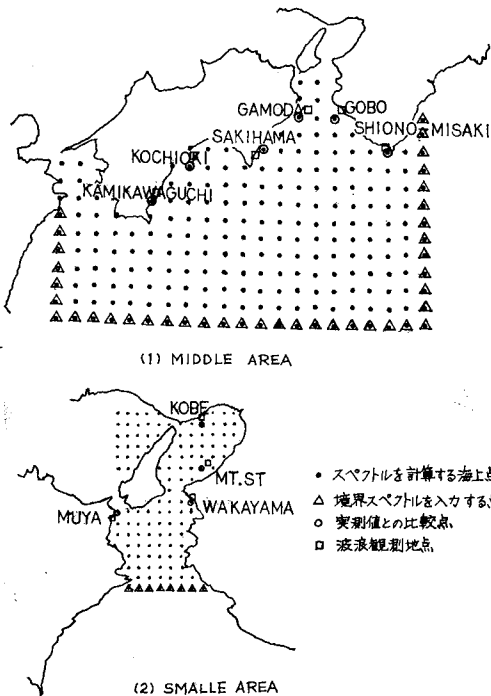


図-1 計算領域及び比較地点

設定した。気象資料の入手時間間隔及び計算機容量等を考慮して、各領域で格子間隔は 120, 10, 3.3 哩、格子数は 10×11 , 21×15 , 12×17 とした。 Δt は最低周波数帯の波が $1\Delta t$ 内で 1 格子間隔を越えて移動しないように各々 3, $1/4$, $1/12$ 時間とした。計算は以下の手順に従って代表周波数を $0.04 \text{ Hz} \leq f \leq 0.26 \text{ Hz}$ の間の 12 とし、方向は 30° 毎に 12 分割した成分波について行なった。

① 任意の格子点でその風速に応じた $S_\infty(f_i)$ を計算し、風向を中心にした 5 方向帯に $G(\theta)$ の値を乗じて $S_\infty(f_i, \theta_i)$ を求める。② 時間 t での初期スペクトルとして入っている $S_0(f_i, \theta_i)$ と比較して、 $S_0 < S_\infty$ の場合には未だスペクトルが成長しうる余地があるので式 (1) により Δt 後の値を計算するが、 $S_0 \geq S_\infty$ の場合には既に成熟しきっているので計算しない。

また、境界スペクトルとして広領域の外周の格子点では各タイムステップ毎に S_∞ の 5 割を与え、中 (狭) 領域の境界では対応する時刻における広 (中) 領域での当該格子点の $S(f, \theta)$ を与えて計算の連続性を保った。

b) 波の伝播

波の伝播は各成分波の伝播速度 c_g が異なるので同じ時間が経過しても伝播距離は同じではない。従って、常に隣接する格子点を経て波を伝播させるために、各周波数毎に移動すべきタイムステップ間隔を定めた。また、周囲に滑らかで均一な伝播となるように、伝播方向毎に隣接格子点へのエネルギー配分率を工夫し、3 つの伝播パターンを定め順に繰り返し用いた。

c) 友ヶ島水道での回折

狭領域においては友ヶ島水道での処理が問題となる。ここでは、近似的方法として格子点 P を設定し、東西方向に近い 4 方向帯の成分は 0 とし、南北方向には水道幅と格子間隔の比 0.6 に相当する量のエネルギーしか流入しないものとした。次に、水道幅と波長との関係から半無限堤の回折を適用しても十分と考え、 $f \leq 0.115 \text{ Hz}$ の成分波について、点 P で f 毎の回折係数に応じたエネルギーを流入する方向帯に配分した後、b) と同じ方法で湾内を伝播させた。

d) 有義波諸元の算定

実測値との比較等のため波の代表値として、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均周期 $\bar{T}$ を次式から求めた。

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 2.83 \sqrt{2 \sum \sum S(f_i, \theta_i) \cdot \Delta f_i} \\ \bar{T} &= \sqrt{\frac{\sum \sum S(f_i, \theta_i) \cdot \Delta f_i}{\sum \sum f_i^2 \cdot S(f_i, \theta_i) \cdot \Delta f_i}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

また、有義波周期 $T_{1/3}$ と $\bar{T}$ との関係は実測データから種々の関係式が提案されているが、ここでは $T_{1/3} = 1.1 \times \bar{T}$ とした。卓越波向は $S(\theta_i) = \sum S(f_i, \theta_i) \cdot \Delta f_i$ が最大となる方向 θ_i とした。

(2) 風場設定法

風場推定精度は、波浪推算精度全体に直接大きく影響するものであり、より実際に近いものが望ましい。このため、天気図から各地の観測風と気圧配置をみながら風の流線図・等風速線図を描き、直接各格子点での風向・風速を読み取る方法 (風場 1) を用いたが、この方法は気象に関する高度な知識と相当な手間を要することから、次の 2 通りの簡便な方法も検討した。

風場 2; 台風の場合 Myers の式により台風域内の気圧分布を円形近似し, 図-2 の中心対称風 U_1 と場の風 U_2 とをベクトル合成して海上風 U の風向・風速を求めた. 詳しい算定方法は他の文献に譲るが, 今回傾度風速から海上風速へ換算する係数 α については, 最近の光田⁹⁾と Katsui⁷⁾

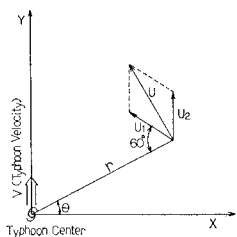


図-2 風場 2 での合成風 U

による台風眼周辺での風特性に関する研究成果に基づき次のように変更した.

$$\alpha = \begin{cases} 1.0 & (r < \xi_0) \\ (0.4r + 0.6\xi_0 - r_0)/(\xi_0 - r_0) & (\xi_0 \leq r \leq r_0) \\ 0.6 & (r > r_0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで,

$$\xi_0 = r_0 \sqrt{2 \log(P_\infty/P_0) / \log(P_\infty/P_0) - 1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ξ_0 は台風眼の半径, r は台風中心からの距離, P_0 は台風中心から最大風速となる点までの距離 r_0 での気圧, P_∞ は $r \rightarrow \infty$ での気圧, P_0 は台風中心気圧である.

風場 3; 低気圧の場合気圧変化が台風ほど急激でない, 各格子点での気圧データを天気図から直接読み取り, $\alpha=0.6$, 偏角 20° として地衡風近似により風向・風速を求めた.

4. 波浪推算結果

(1) 波浪推算手法の検証

ここでは, 提案した推算手法を検証するため, 沿岸及び湾内で実測波浪記録が多く取得され, 比較的規模の大

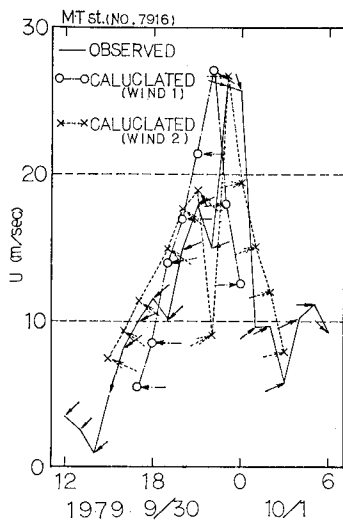


図-3 風経時変化図
(台風 7916 号, MT 局)

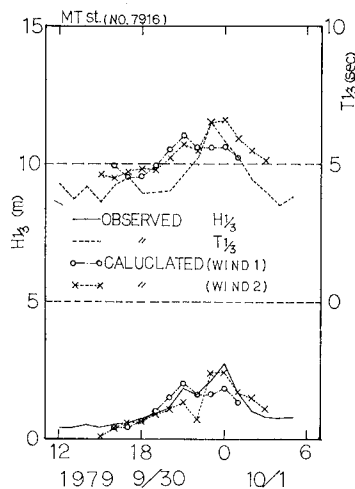


図-4 波浪経時変化図
(台風 7916 号, MT 局)

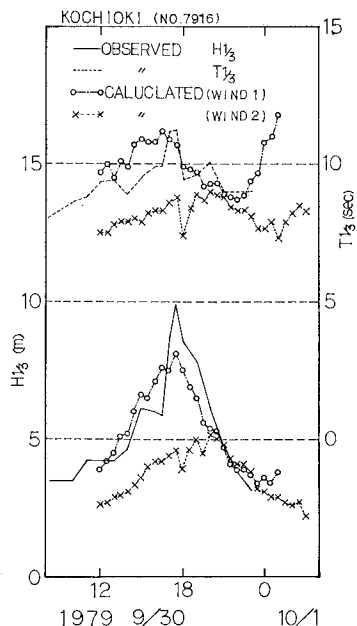
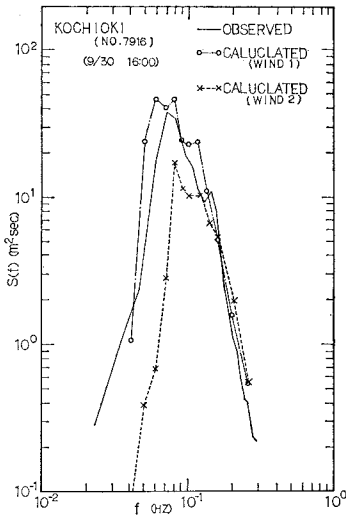
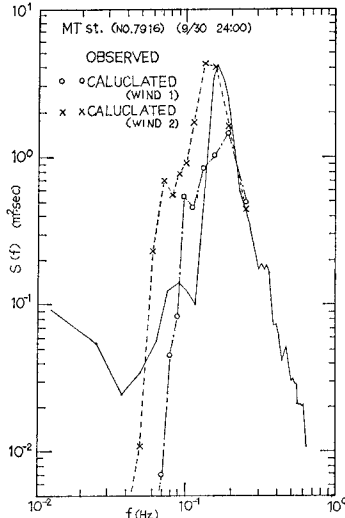


図-5 波浪経時変化図
(台風 7916 号, 高知沖)

きな台風 7916 号 (1979 年 9 月 29 日~10 月 1 日) 及び日本海低気圧 (1980 年 4 月 5 日~7 日) に適用し, 実測値との比較検討を行なう. 風場は, 広領域は 6 時間毎の極東天気図, 中・狭領域は台風は 1 時間, 低気圧は 3 時間毎の局地天気図から風場 1 の方法を用いてより実際に近い風場を与えた. 計算期間は, 台風は広領域では外洋のうねりが計算できるように台風上陸の約日 4.5 前~約 0.5 日後, 中・狭領域では 1 時間毎の局地天気図が入手できた上陸前後約 14 時間とした. 低気圧は広領域では実測波高のピーク 1.5 日前~0.5 日後とし, 中・狭領域では同様に 14 時間前~5 時間後とした. 初期条件は, 広中領域では計算開始時の波の成長を早め実際の通常時の海面状態に早く達し, かつ計算時間を短縮させるために $t=0$ で $S_0=0.1S_\infty$ とし, 狭領域では $S_0=0$ とした. また, 台風の場合計算期間の短さを補うために, 簡便な風場 2 による風場の下での事前計算を中領域では 1 日分, 狭領域では 5 時間分行なった. 比較地点は, 中領域では高知沖等 6 地点, 狭領域では MT 局等 4 地点とした (図-1). 図-3~11 に比較例を次節 (2) の結果と共に示す.

台風の場合, 図-3~8 から次のことがわかる. 推定した風場は概ね実測風を再現しており波浪は高知沖ではピーク後やや実測値より波高が小さくなるが, MT 局では深海波としての推算にもかかわらず良く一致している. また, スペクトル構造は高知沖ではピーク前では非常に良く合っているが, ピーク後は f peak での成長が小さめであった. MT 局ではうねり成分が実測値ほど顕


 図-6 1次元スペクトル図
(台風 7916 号, 高知沖)

 図-7 1次元スペクトル図
(台風 7916 号, MT 局)

著に現われておらず、湾内発生波のエネルギーも小さいが、方向スペクトル全体の分布傾向は比較的一致している。これら実測値との差は、地形補正等を行わずに風場を設定したこと、高知沖ではピーク以後欠測であったため、この付近の風場を実際より小さめに推定したこと及び湾内でも外洋と同じ周波数分割を用いたため高周波成分のエネルギーが捕えにくかったこと等による影響があるものと考えられる。

また、低気圧の場合には 図-9～11 から、推定した風場は全般に実測値より小さく、風向はほぼ一定となっており、波浪は高知沖では波高・周期とも実測値より若干小さいが、

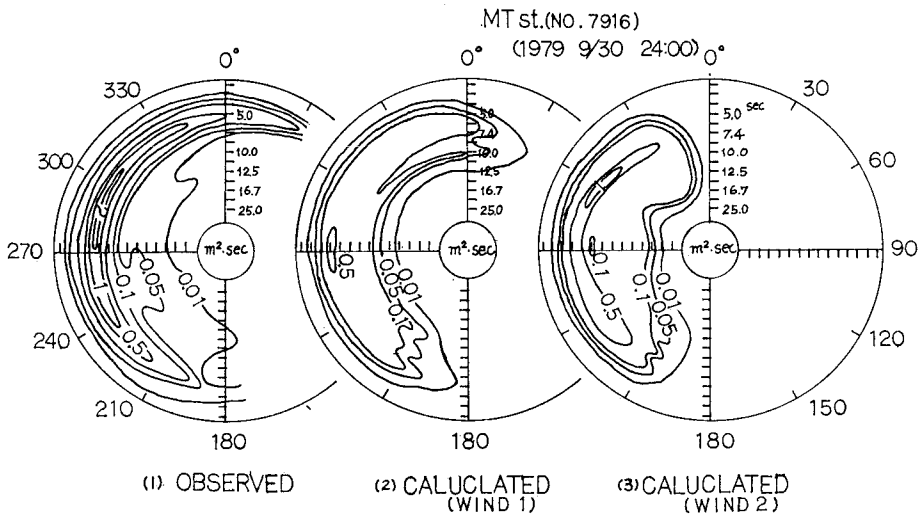


図-8 方向スペクトル図 (台風 7916 号, MT 局)

MT 局では周期は逆に大きくなっていることがわかる。湾内では $f < f_{\text{peak}}$ のスペクトルが良く合っているのにこの様な状況になるのは、前述したように現在の周波数分割では $f > f_{\text{peak}}$ の波を計算できずに有義波諸元を算定しているためと考えられる。

以上、湾内でのうねりの再現性等に多少問題点を残しているが、風場をある程度正確に推定できれば経時変化、スペクトル構造ともかなり精度の高い結果が得られることが分った。

(2) 風場設定法の比較

台風について風場 1 と 2 を比較すると、MT 局では風・波ともほぼ同じ経時変化を示すが、台風眼の α を修正し風速を大きくしたことにより台風通過時のピーク値は

風場 2 の方が大きくなり、より実測値に近づいた。しかし、図-5, 6, 12 から台風が沿岸付近に位置する時は、風場 2 では陸風が卓越する沿岸地域で f_{peak} 帯での風波の成長が押さえられ、波高・周期とも小さくなる傾向がみられる。これは、海陸境界点では陸風の時は波の成長計算時間を通常の半分にしていること、台風左半円側では逆風によるうねり成分の減衰が大きすぎる等の原因が考えられるが、今後更に検討していく必要がある。このように、風場 2 による推算値は台風眼付近での推算に若干改善の余地があるが、全般的に風速が風場 1 より大きくなった分だけピーク波高が高まるなど全体としては十分に有効な結果である。また、低気圧について風場 1 と 3 を比較したが、風場 3 は地衡風近似のためエネルギー

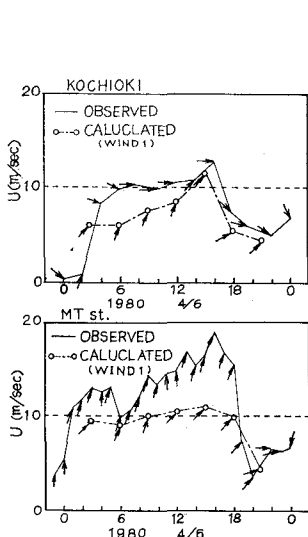


図-9 風経時変化図
(日本海低気圧)

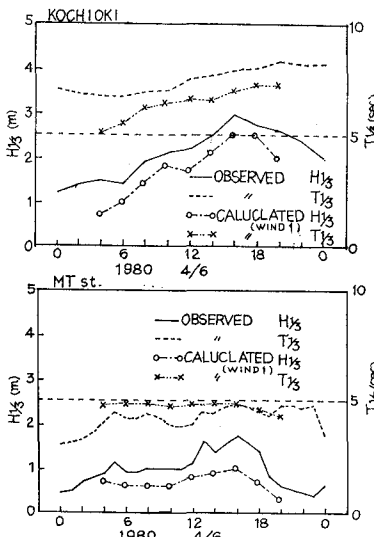


図-10 波浪経時変化図
(日本海低気圧)

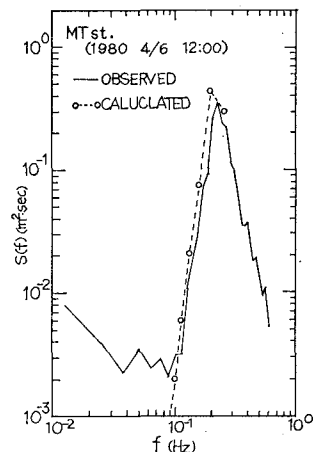


図-11 1次元スペクトル図
(日本海低気圧, MT局)

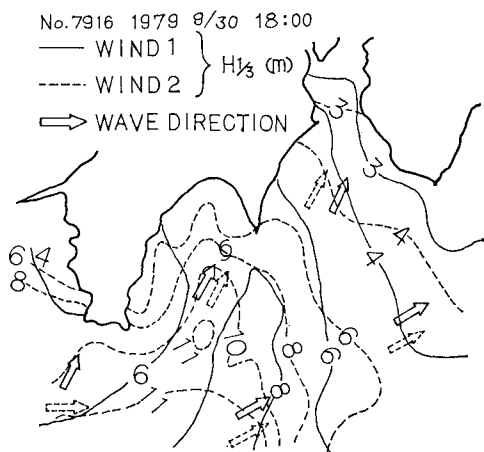


図-12 波浪平面図(台風7916号)

分布にバラツキが生じ、風場1、実測値とも異なった傾向を示した。今後は、等圧線の曲率を考慮した傾度風近似への改良が必要であると考え。

5. 結 語

以上、本研究では井上モデルに基づいてスペクトル法による波浪推算プログラムを開発し、四国沿岸から大阪湾にかけての推算値と実測値とを比較した。その結果、従来の推算手法による結果と比べても波浪経時変化は実測値と良く一致するようになり、スペクトル構造もかなりの精度で推算できるなど中味の濃い推算結果が得られることが分った。また、台風の場合には風場を簡便な風場2による方法で設定しても、かなりの推算精度があることが明らかとなった。今後は、沿岸及び湾内全体での風特性を調べ、地形の影響を考慮した簡便な風場設定法

について検討するとともに、狭領域においては友ヶ島水道での回折効果の見直しを含め、浅海波としての考慮が可能なプログラムに改良して、大阪湾内で2山型スペクトル構造となるケースも定量的に推算可能なものとするよう検討を進めていきたい。

最後に、本研究において気象資料の整理、数値計算の実施及び結果の整理にあたって御助力戴いた第三港湾建設局神戸調査設計事務所小泉勝彦技官並びに(財)日本気象協会関西本部鈴木善光氏はじめ関係者に深く謝意を表す。なお、本研究の計算は港研に設置してある港湾情報処理システムの ACOS 800-II によれば計算容量約120KW、計算時間は風場設定法やケース等により異なるが約40~50分を要した。

参 考 文 献

- 1) Inoue, T.: On the growth of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to wave forecasting, Geophy. Science Lab., TR-67-5, New York Univ., 1967.
- 2) Isozaki, I. and Uji, T.: Numerical prediction of ocean wind waves, Paper in Meteorol. and Geophy., Vol. 24, No. 2, pp. 207~231, 1973.
- 3) 高橋智晴・広瀬宗一・佐々木徹也: 沿岸波浪推算法についての考察, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 117~121, 1977.
- 4) 高橋智晴・副島 毅・金子大二郎: 南西諸島及び九州南岸の沖波(深海波)の推算, 運輸省港湾技研資料, No. 207, 1975, 他
- 5) 広瀬宗一・高橋智晴: 大阪湾における波浪特性, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 104~108, 1980.
- 6) 光田 寧・末延龍雄: 台風の中心付近の構造について, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-1, pp. 281~287, 1970.
- 7) Katsui, T.: A dynamical treatment of the structure in the lowest layer of typhoon, Geophy. Mag., Vol. 40, No. 1, 1981.
- 8) 山口正隆・土屋義人・小矢田 宏・渡辺 健: 有限風域場における波浪の数値予知法, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 96~100, 1979.