

大阪湾における台風時の波浪の数値計算

合 田 良 実*・永 井 康 平*

1. 緒 言

台風 6420 号および 6523 号により、大阪湾沿岸の各地は波浪と高潮によって大きな災害を受けた。その波の大きさはかって予想され得た以上のものであったことと同時に、6420 号の西宮や 6523 号の岩屋等で得られた波浪の実測値のスペクトル解析の結果から、大阪湾外から友ヶ島水道を通して侵入する 10 秒以上の長周期波の影響が大きいのではないかという問題が起こった。これらの問題は設計波の決定とも関連するため、その機構の解明が急がれている。

現在までに橋本¹⁾、平沢²⁾、川鍋他^{3)~6)}らによって大阪湾外からの侵入波に関する研究が行なわれているが、著者達は運輸省第三港湾建設局の依頼により、それらとは別の方法を用いて大阪湾での台風時の波浪の統計的性質と湾外からの長周期波の侵入について検討してきた^{7), 8)}。それは、現在まで台風時の波浪の実測値が十分得られていないことから、過去の台風の天気図資料⁹⁾を用いて大阪湾内発生風波と湾外発生波を数値計算したものである。計算した台風は室戸台風(1934 年)から台風 6713 号(1967 年)に至る 45 台風で、その間大阪湾に影響をおよぼしたほとんどすべての台風を網羅している。大阪湾外から友ヶ島水道を通して侵入する波としては、北緯 30.6° 以北の太平洋上で発生したうねりを考えている。

これらの数値計算による推算結果は、統計的处理を施すことによって大阪湾内各地点の波浪の性質を明らかにし、港湾ならびに海岸構造物の合理的な計画、設計、施工に役立てることが可能であり、ここにその結果の一部を報告する次第である。

2. 風と波の計算方法

台風域の波浪の図式計算法としては、橋本¹⁾が用いた Walden の計算図表、第三港湾建設局¹⁰⁾が用いた阪本・井島の図式解法等いろいろ考えられる。しかし計算者の主観による誤差の回避と計算時間の節約の面からいって、信頼できる数値計算法によるのがよいと考え、著者らは井島博士の開発された台風域内の浅海波の数値計算法¹¹⁾を基にして電子計算機で計算を行なった。ここで計算遂行に当り御指導と御理解を頂いた井島博士に謝意を表す

る次第である。なお (1)~(3) 以下に述べる計算はすべて港湾技術研究所の電子計算機 TOSBAC 3400 で行なった。

(1) 風の計算法

台風を中心から $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ の距離の気圧分布 $P(r)$ を同心円で近似し、それが Myers¹²⁾ の示した式

$$P(r) = P_c + \Delta P \cdot e^{-r_0/r} \dots \dots \dots (1)$$

で表わし得るとすると、宮崎¹³⁾および井島¹⁴⁾によって、台風の風速分布 $U(r)$ はつぎのように表わされる。

$$U(r) = C_1 F(r) \sqrt{1 + M^2 - M(\sin \theta_0 - \sqrt{3} \cos \theta_0)} \dots \dots \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} F(r) &= \sqrt{\frac{4P}{\rho_a} \cdot \frac{r_0}{r} e^{-r_0/r} + \left(\frac{c}{2} r\right)^2 - \frac{c}{2} r} \\ M &= \frac{V}{F(r_0)}, \tan \theta_1 = \frac{\sqrt{3} + 2M \cos \theta_0}{1 - 2M \sin \theta_0} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ここで $F(r)$ は式 (1) を用いて導いた静止台風の傾度風速、 V は台風の進行速度、 c はコリオリの係数、 ρ_a は空気密度、 θ_0 は台風中心から考えている地点方向への x 軸からの角度、 θ_1 は考えている点での風向と台風中心方向とのなす角度である。式 (1) の P_c は台風を中心気圧、 ΔP は台風圏外の気圧と中心示度の差、 r_0 は中心から大略最大傾度風速地点までの距離になっている。

式 (1)~(3) の台風域の風速を表わす式は、考慮した要素と風速分布の形からいって、現在最も適切なものと考えられている。ただし台風域内に不連続線がある場合には、式 (1) の気圧分布があてはまらないことが起こり、したがって式 (2) の風速分布も場所によっては非常に異なることがあるので注意を要する。

実際の風速計算においては台風の進路 (x, y) と ΔP 、 r_0 、 V を一時間ごとに与え、その間には内挿した値を用いて式 (1)~(3) から風速を決定した。ここで ΔP と r_0 は以下のようにして決定した。まず中心気圧 P_c として台風が大阪湾に最も接近する時刻前約 5 時間の平均示度を取り、その時刻の天気図⁹⁾による台風の東側の r と $P(r)$ を図-1 のように半対数紙上へプロットする。すると式 (1) からこの点が直線上にのることになるので、図上で折線を近似し、縦軸の切片を ΔP 、折線の平均勾配を r_0 とした。この ΔP と r_0 を基に式 (2)、(3) で風速の計算をして神戸、大阪、和歌山の実測風速とくらべ、実測

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

値は陸上風であることも考慮して最も妥当な ΔP , r_0 を決定した。図-2 にこうして決定した ΔP と r_0 による計算風速と実測風速との比較を、一例として台風 6523 号について示した。

(2) 風波の計算法

台風域内の風波の発生、発達、減衰の計算は井島の方法^{(11), (14)}にしたがい、Wilson のフェッチ式⁽¹⁵⁾を基本にし

図-1 ΔP , r_0 の決定法 (台風 6523 号)

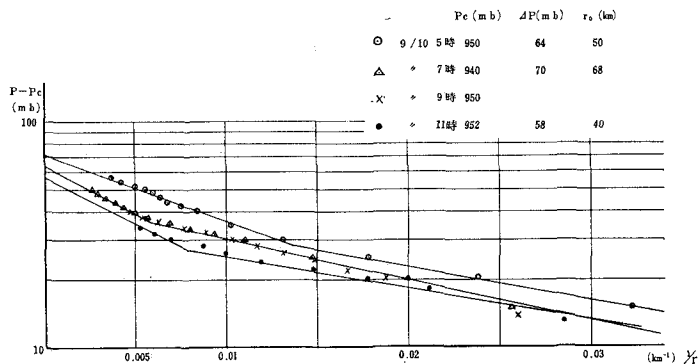
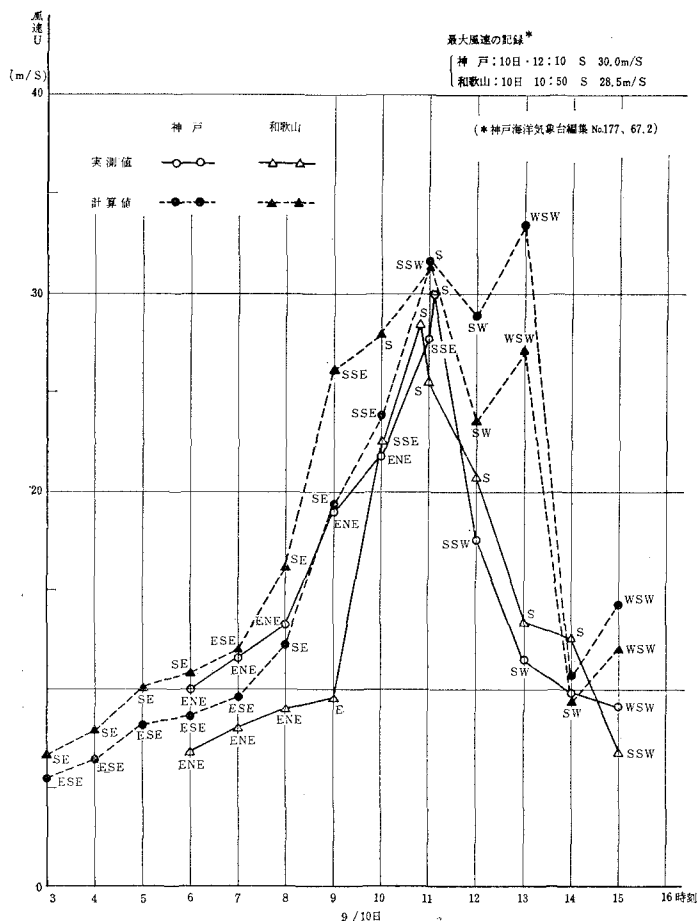


図-2 実測風速と計算風速の比較
(台風 6523 号)



て以下のように計算した。一定風速 U の吹送によるフェッチ F , 水深 D の地点での有義波高 H とその周期 T , 群速度 C_g が

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha_0 A \left[1 - \left\{ 1 + \frac{K_1}{A} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right]$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \frac{2C_g}{U} = \beta_0 B \left[1 - \left\{ 1 + \frac{K_2}{B} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right]$$

.....(4)

$$A = \tanh K_3 (gD/U^2)^{3/4}$$

$$B = \tanh K_4 (gD/U^2)^{3/8}$$

.....(5)

で与えられるとする。ここで $\alpha_0 = 0.30$, $\beta_0 = 1.37$, $K_1 = 0.004$, $K_2 = 0.008$, $K_3 = 0.578$, $K_4 = 0.520$ である。

この式を応用するために、まずつぎの仮定を設ける。a) 浅海でも波の屈折は無視し、風波は常にそこで吹送している風の主方向に向かって進行する。b) その場合波向が θ だけ変わると波高は $\cos \theta$ だけ低下するが、周期は変わらない。c) 風波は台風域の各点から発生し、ある地点に到達した波の内最大のもをその地点の有義波とする。

いま、地点 a で風波の波高が H_a であるとし、この点で進行方向を θ だけ変え、風速 U_a を受けて発達しながら ΔF だけ進んで地点 $(a+1)$ に達するとすると、この点の波高 H_{a+1} は、式(4), (5) と上記の仮定により、微小距離 ΔF の一次の項までとって

$$H_{a+1} = H_a \cos \theta + \frac{(\alpha_0 K_1)^2}{(\alpha_0 A_a)^{5/2}} \times \frac{Y^2}{(\alpha_0 A_a)^{1/2} - Y^{1/2}} \Delta F$$

$$Y = \alpha_0 A_a - \frac{g H_a \cos \theta}{\alpha_0 H_a - g H_a \cos \theta / U_a^2}$$

.....(6)

となる。同様にして発達時の波の周期 T_{a+1} , 群速度 C_{a+1} および浅海域で海底摩擦によって減衰する波の式も導かれるが、詳細は上記文献^{(11), (14)}を参照されたい。

なお波が深海において発達し切った状態においては、

$$\alpha_0 > g H_a \cos \theta / U_a^2, \beta_0 > 2 C_a / U_a$$

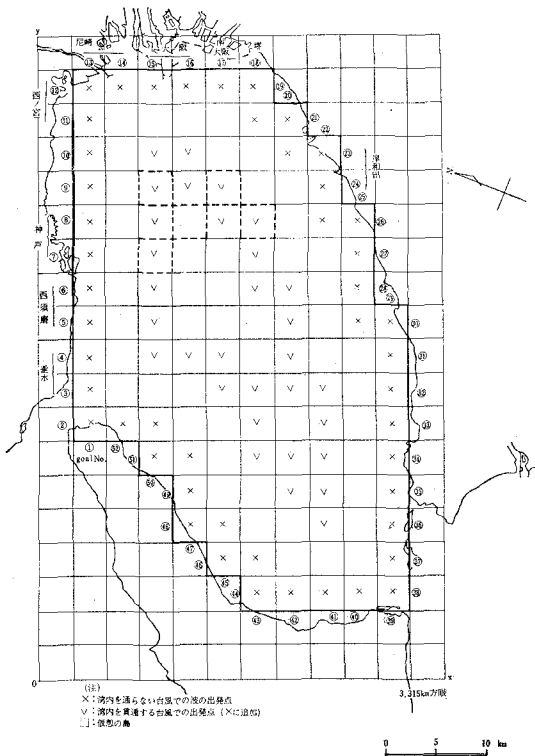
.....(7)

が満たされなくなり、式(6)他の分母の平方根の中が負となる。したがって式(7)の条件が破れた場合、波は風速の減少のためうねりになると考え、計算を打ち切った。

以上の理論による実際の風波の計算では、微小距離 ΔF の間は風速 U 、水深 D が一定で、この間を波は一定の群速度 C_g で進行するとして取扱う。しかし群速度 C_g が小さくなって波が ΔF を進むに要する時間 $\Delta t = \Delta F / C_g$ が大きくなると、風速、水深、群速度が一定という仮定が近似されなくなるので、 ΔF と Δt に以下の規定を与えた。大阪湾内で水深 $D > 10$ m の区域では $\Delta F = 2$ km または $\Delta t = 20$ 分、 $D \leq 10$ m では $\Delta F = 1$ km または $\Delta t = 10$ 分とする。そして $C_g \geq \Delta F / \Delta t$ によってそれぞれ $\Delta F = \Delta F$ 、 $\Delta F = C_g \Delta t$ とした。なお $\theta \geq 90^\circ$ では式 (6) の値が負になるので、 $\theta \leq 70^\circ$ に制限し、それ以上に方向の変わる波は計算を打切った。

大阪湾の地形は図-3 に示す格子によって表わした。格子は x 方向 12、 y 方向 19 ますの 3.315 km 方眼で、波の発生、発達、到達領域をカバーしている。この直角座標 (x, y) により台風の経路、波の進行を規定する。図中各格子の中心において、海図から読み取った基準面からの水深に実際の潮位を加え、計算のための水深を与えた。潮位は各台風が大阪湾に最も接近した時刻の実測値⁹⁾を与え、その時間的变化は水深にくらべて小さいので無視した。格子中心の水深が決まれば、中間にきた波のその位置の水深は周囲 4 格子中心点の水深をそれらの点からの距離で比例配分して決定される。波は図-3 に示した沿岸の格子の中心から 30 分ごとに発生し、図中太線の到達線に入ってその計算を終る。

図-3 大阪湾内発生波の計算メッシュ

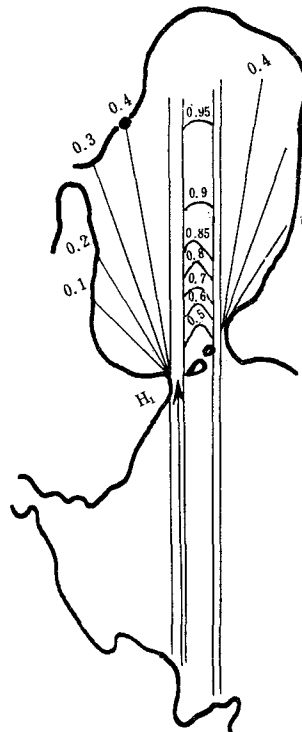


ただし大阪湾上を貫通する台風の場合は波の進路(風向)が急変することを考慮し、図に示した通り湾央からも波を発生させた。また湾央の波をチェックするために仮想上の島を設け、その地点を通る波の諸値を求めた。

(3) うねりの計算法

大阪湾外での発生波が友ヶ島水道を通過して湾内に伝播する機構としては、現在までにいくつかの考え方が示

図-4 角伝播係数



されている。橋本¹⁾は台風とともに移動する風場を考え、友ヶ島水道では沖の島と地の島の存在を無視して、Walden の計算図表から伝播波の波高、周期を求めた。平沢²⁾は図-4 のように徳島県東部から発生した波が由良瀬戸と加太瀬戸から直線的に湾内へ侵入し、そこでは Neumann の角伝播によって波が分散すると考えた。川鍋他⁶⁾は由良での目測された波が由良瀬戸(幅 4.5 km)だけを通して角伝播するとして計算した。

一方著者達は図-4 の考え方のほかに、同じく徳島県東部で発生

した風波が湾内のある地点に伝播したとき、友ヶ島水道と湾内のその地点の各幅員線上でエネルギー保存則が成り立つとして求めた伝播波高に対応する仮想フェッチだけの波高が実際には伝わるという考え方等⁸⁾を検討した結果、徳島県東部の発生波では大阪湾内に 10 秒以上の長周期波¹⁰⁾をもたらしなことがわかった。そこで図-5 に示すような北緯 30.6° より紀伊水道までの太平洋上において(2)に述べた風波の理論にしたがい発達し、そこでうねりとなった波または紀伊水道に到達した波を捉え、大阪湾へ伝播させることにした。図-5 の格子間隔は 20 km であり、 $\Delta F = 6$ km、 $\Delta t = 1$ 時間で計算した。なお紀伊水道を発生域の北限としたのは、(2)の推算法では風向の関係で太平洋上の波が直接友ヶ島水道に到達することはないことが試算により判明したからである。

さてこのようにして紀伊水道に到達した波浪は、図-6 を参照して、以下のように大阪湾内へ伝播するものとする。紀伊水道のある線上(フェッチ前縁)での波を周波数および方向スペクトルをもつ波とみなす。その線

図-5 湾外発生波の計算メッシュ

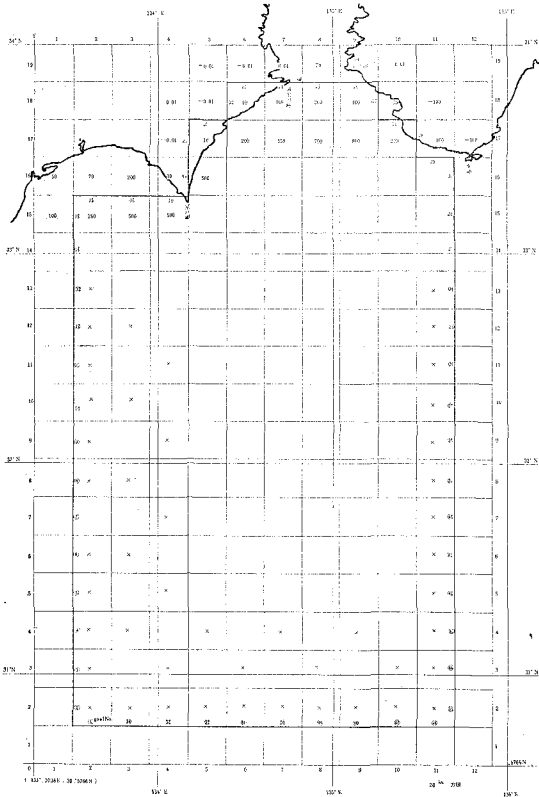
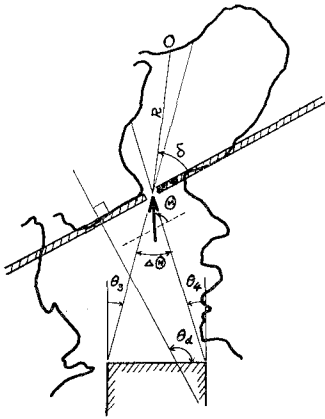


図-6 紀伊水道からのうねりの伝播



上での既知の有義波高 H より, Longuet-Higgins が示した波の統計的性質を用いて次式で E -値を計算する。

$$E = (H/2.83)^2 \dots \dots \dots (8)$$

この波のエネルギーに相当する無限フエッチの等価風速 U は, Neumann のスペクトル¹⁷⁾を用いると

$$\left. \begin{aligned} U &= g \{ 3 \sqrt{\pi C / (32 \sqrt{2} E)} \}^{1/5} \\ C &= 4.8 \text{ m}^2/\text{sec}^5 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

となる。そしてその波の角周波数 $\omega (=2\pi f = 2\pi/T)$, 方向 θ でのエネルギー スペクトル密度 $S(\omega, \theta)$ は

$$\left. \begin{aligned} S(\omega, \theta) &= K(\theta) C \omega^{-6} \cdot e^{-2g^2/(\omega U^2)} \\ K(\theta) &= 2\pi^{-1} \cos^2 \theta, \quad 0 \leq |\theta| \leq 90^\circ \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

と Neumann スペクトルをもつものとする。ここで $K(\theta)$ は θ 方向の方向スペクトル (角分散係数) である。そしてこの紀伊水道における式 (10) の波には, **a)** 海水の粘性, 空気抵抗, 海底摩擦等の外力が働かず, **b)** 各周波数成分が独立に群速度で伝播すると仮定し, 線フエッチの波の角分散と速度分散を考えた P-N-J 法¹⁷⁾により友ヶ島水道へうねりとして伝播させた。

こうして求めた友ヶ島水道でのうねりの到達波は周波数成分波が線型重ね合せを行ない得る性質の波であること, 図-6 のうねりの到達方向幅 $\Delta\theta$ が約 30° 以内であること, および友ヶ島水道の地形, 水深等の条件からいって, 主水道である由良瀬戸 (幅 4.0 km) を通って回折現象を起こすものと考えた。そこで図-6 のような方向と開口部をもつ仮想の完全反射堤を友ヶ島水道に設けると, 開口部への入射角 θ は, 紀伊水道でのフエッチ縁での角度 θ_3, θ_4 (右回りを正) と同様の測り方で求めたある出発角度 θ ($\theta_4 < \theta < \theta_3$) で進んだ方向成分波に対して

$$\theta = 2\pi - \theta_d - \theta, \quad (\theta_4 < \theta < \theta_3) \dots \dots \dots (11)$$

となる。つぎに考えている時刻に友ヶ島水道で存在するうねりの周期幅 ΔT を dT ごとに i 等分して

$$\Delta T = \sum_i dT \dots \dots \dots (12)$$

とし, 同様に入射角度幅 $\Delta\theta$ を $d\theta$ ごとに j 等分して

$$\Delta\theta = \sum_j d\theta \dots \dots \dots (13)$$

とする。そして周期 $T_i \pm dT/2$ の幅内でのエネルギー ΔE_{T_i} を j 分類された式 (11) の入射角度 θ_j に振分ける。そうすると, このある方向 θ_j ある周期 T_i の成分入射波のエネルギーを $\Delta E_{T_{ij}}$ とすれば, 友ヶ島水道でのうねりの全エネルギー E_B は

$$E_B = \sum_i \sum_j \Delta E_{T_{ij}} \dots \dots \dots (14)$$

である。大阪湾内のうねりの観測点 $O(R, \delta)$ での全伝播エネルギー E_0 は, 入射角 θ_j , 周期 T_i の成分正弦波のその観測点での回折係数を $K_{d_{ij}}$ として

$$E_0 = \sum_i \sum_j (K_{d_{ij}})^2 \Delta E_{T_{ij}} \dots \dots \dots (15)$$

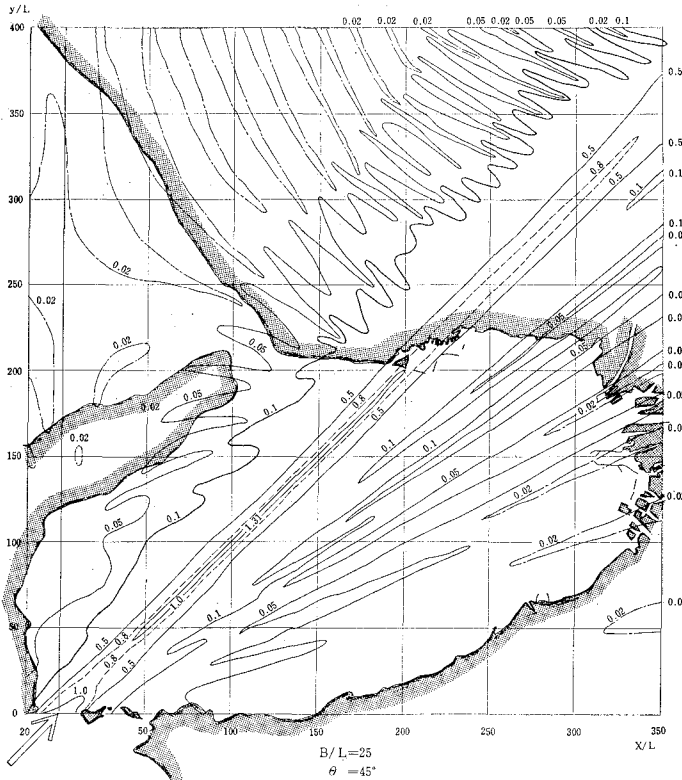
で求められる。こうして観測点のある時刻の全エネルギー E_0 が求まれば, うねりの有義波高 H と平均周期 $\bar{T}$ は

$$\left. \begin{aligned} H &= 2.83 \sqrt{E_0} \\ \bar{T} &= \sqrt{E_0} / \left\{ \int_{f_1}^{f_2} f^2 S_0(f) df \right\}^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

で計算される。ここで $S_0(f)$ は観測点 O でのその時刻のうねりの f 周波数成分エネルギーであり, f_1 と f_2 はそれぞれうねりに存在する周波数の下限と上限である。

本報告の回折係数の計算は高井¹⁸⁾が作成したプログラ

図-7 うねりの成分波の回折係数(大阪湾の地形図は
 $T=10.05$ 秒の波の場合)



ムを用いて行なった。仮想堤体は開口幅 $B=4.0$ km の完全反射堤で、波の周波数分割幅 df を 0.005 cycle/sec, 入射角度間隔 $d\theta$ を 5.0 度として計算した。図-7 に友ヶ島水道で周期 $T_i=10.05$ sec, 波長 $L_i=160$ m すなわち $B/L_i=25$ の場合について、入射角 $\theta_j=45^\circ$ であるうねりの成分正弦波の回折係数を示した。この図中に示した大阪湾の地形はこの周期の波の長さの縮尺と一致している。

3. 波浪の数値計算結果とその統計的性質

前章に述べた方法により波浪の数値計算を行なった台風は表-1 にあげた 45 台風である。その結果を主に神戸についてまとめた。

(1) 大阪湾内発生風波について

湾内(図-3 参照)での発生風波の計算結果を表-1 に示した。表中第 2, 3 欄に掲げた台風の進行方向と進行速度 V は、台風中心の神戸への最接近時以前 6 時間の平均の進行方向と速度を表わしている。第 4 欄に示した $R_{\min}$ はその最接近時の神戸と台風中心との距離で、台風が神戸の東側を通過した場合に正の値としている。表-1 から、まずこれらの台風の ΔP と r_0 の間には明確な相関は認められないことが知れる。

表-1 の最後の欄にあげた波高分布の型とは、図-8

~11 に示す通り、大阪湾沿岸の西宮と尼崎を境にしてその西側と東側の波高の大きさの分布状態の型を表わしている。これらの型は風の吹き具合、すなわち台風の進行経路と進行速度 V に関係するものと考えられる。I 型はいわば西高東低型で、 $R_{\min}$ が負の -100 km 以下の値で進行速度 V が 50 km より小さい値の場合によく起こっている。II 型は東西均一型で、 $R_{\min}$ が -100 km 以上で V が $30 \sim 50$ km の場合に起こりやすい。III の東高西低型は $R_{\min}$ が正の場合に進行速度 V に関係なく起こり、特殊な場合として台風が湾の中央を NE 方向に通過する($R_{\min} < 30$ km)と、その時の湾央の風向の急変により波の起時が東西で二分され、図-11 のような IV 型となっている。以下にも触れるが、この IV 型の波は I, II 型とくらべ波高は必ずしも高くない。

ここで表-1 の推算値の中で最も高い波高 4.4 m を生じた台風 6523 号について考えてみる。その波高周期の時間分布図を後の図-17、湾内各地点の有義波の

図-8 湾内の波高分布の型 I. 西高東低型(枕崎台風)

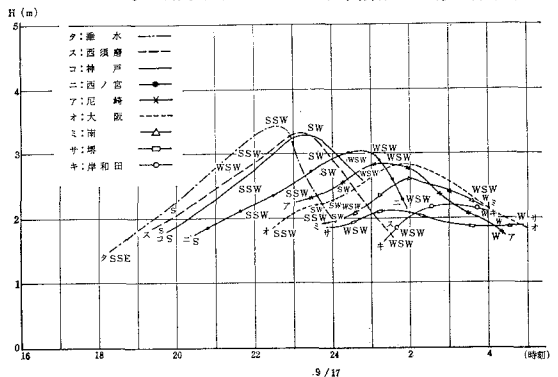
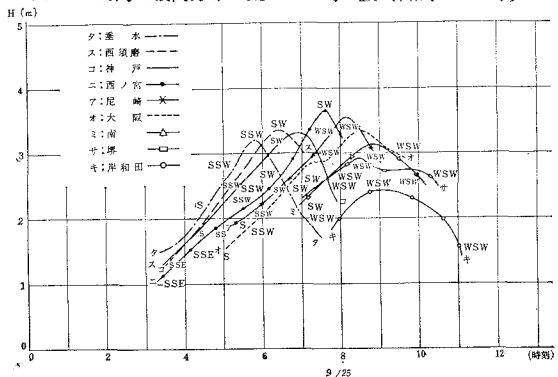


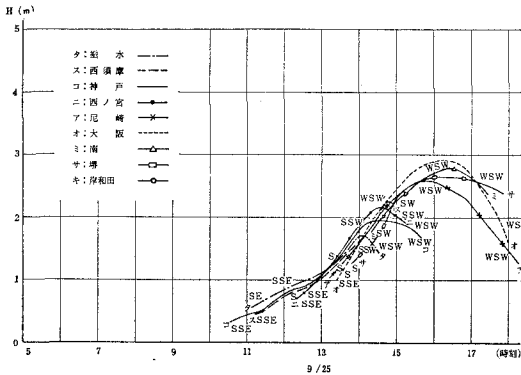
図-9 湾内の波高分布の型 II. 均一型(台風 6420 号)



表一 計算した台風の諸値と大阪湾内発生波の推算結果

台 風 名	進行方向	進行速度 V (km/hr)	R _{min} (km)	ΔP (mb)	r ₀ (km)	神戸での最大値			湾沿岸での最大値				波高分 布の型
						H (m)	T (sec)	波 向	H (m)	T (sec)	波 向	地 点	
6734	NE	54	156	66	116	0.8	3.1	ENE	2.3	5.0	W	岸和田	Ⅲ
6718	NE	18	132	27	46	0.4	2.5	ENE	1.2	4.0	NW	泉佐野	Ⅲ
6626	NNE	66	266	66	55	なし	なし	なし	1.0	3.8	W	岸和田	Ⅲ
6624	NE	65	-26	18	44	2.3	5.4	SW	2.9	5.7	WSW	東神戸	Ⅱ
6619	NE	39	-120	23	52	1.8	4.4	SW	1.9	4.5	NNE	西須磨	Ⅲ
6524	NE	53	160	49	156	0.8	3.1	ENE	2.2	5.0	WSW	南大阪	Ⅲ
6523	NNE	60	-50	64	43	4.4	6.8	SW	4.4	6.8	SW	神戸	I
6515	NNE	45	-312	43	42	0.9	3.6	S	1.0	3.7	N	垂水	Ⅱ
6420	NE	61	-78	45	55	3.3	6.0	SW	3.7	6.2	SW	西宮	Ⅱ
6414	NE	29	-107	27	60	2.1	4.7	SW	2.1	5.3	SSW	垂水	I
6309	NW	23	-386	32	126	1.0	3.5	ESE	1.1	3.8	ESE	垂水	I
6303	NNE	62	-119	20	48	1.8	4.5	SW	1.9	4.4	SW	西須磨	Ⅱ
6214	N	35	102	48	79	なし	なし	なし	2.0	4.8	WSW	南塚	Ⅲ
6213	ENE	36	-69	12	100	1.6	4.5	SW	1.9	5.0	WSW	大阪	Ⅱ
6207	NNE	15	67	32	72	0.7	3.0	ENE	2.8	4.8	WNW	泉佐野	Ⅲ
第2室戸	NE	51	26	27	37	2.1	4.5	E	3.4	6.5	WSW	大阪	Ⅳ
6016	NNE	44	-124	45	45	2.4	5.2	S	2.7	5.7	S	垂水	I
6012	NNE	30	-63	20	50	2.3	4.9	SW	2.3	4.9	SW	西須磨	Ⅱ
6011	NNW	18	-138	20	63	1.5	4.1	SSW	1.6	4.6	SSW	垂水	I
5916	ENE	49	32	24	108	1.3	3.8	SE	1.3	4.1	SE	西須磨	I
伊勢湾	NNE	63	81	95	74	なし	なし	なし	2.6	5.3	WSW	泉佐野	Ⅲ
5906	NE	32	61	46	100	1.5	4.3	ESE	2.0	5.0	E	岩屋	Ⅲ
5817	NE	29	56	45	65	1.3	3.9	ENE	2.4	5.3	W	岸和田	Ⅲ
5710	NE	45	55	25	81	2.7	5.6	SW	2.7	5.6	SW	神戸	Ⅱ
5612	NNE	62	-436	68	136	2.0	4.9	S	2.2	5.2	SSW	垂水	I
5609	NE	39	-287	56	199	3.0	5.7	SSW	3.1	5.3	SSW	西須磨	Ⅱ
5526	NE	61	96	30	63	0.6	2.9	ESE	1.8	4.7	W	岸和田	Ⅲ
洞爺丸	NNE	98	-175	50	40	2.8	5.3	SW	2.8	5.5	SW	尼崎	I
5412	N	39	-388	52	119	1.6	4.4	S	1.8	4.8	S	垂水	I
5405	NE	22	-20	35	50	2.3	5.2	SSW	2.8	5.5	WSW	尼崎	Ⅱ
5313	NNE	39	143	88	55	0.9	3.2	ENE	3.1	6.4	NNW	友ヶ島	Ⅲ
5202	NE	61	133	44	51	0.5	2.7	E	1.5	4.2	NW	泉佐野	Ⅲ
ルース	NE	62	-189	40	83	2.3	5.0	SW	2.4	5.1	SW	東神戸	Ⅲ
キシア	NNE	44	-333	56	69	1.5	4.5	S	1.6	4.6	S	垂水	I
ジューン	NNE	50	10	65	44	2.3	5.3	SW	3.2	6.0	WSW	大阪	Ⅳ
4906	NNW	9	85	12	69	なし	なし	なし	0.9	3.0	WNW	岸和田	Ⅲ
4707	NNE	17	167	22	99	なし	なし	なし	1.1	4.1	N	友ヶ島	Ⅲ
阿久根	NE	38	-169	23	38	1.1	3.7	SW	1.1	3.8	SW	東神戸	Ⅱ
枕崎	NE	62	-161	78	60	3.3	6.1	SW	3.4	6.2	SSW	垂水	I
4420	NNE	48	158	58	102	なし	なし	なし	2.2	4.8	WSW	南大阪	Ⅲ
4416	NE	51	-102	47	39	2.6	5.3	SW	2.7	5.6	WSW	大阪	Ⅱ
4217	NNE	51	-71	23	31	2.0	4.6	SW	2.0	4.4	SW	西須磨	I
4114	NNW	39	-158	55	30	1.7	4.6	SSE	2.1	4.8	SSE	垂水	I
4102	NE	59	94	25	95	0.3	1.9	E	1.7	4.6	W	泉佐野	Ⅲ
室戸	NE	66	18	66	35	2.1	5.0	ESE	3.4	5.7	W	岸和田	Ⅳ

図一〇 湾内の波高分布の型 Ⅲ. 東高西低型 (台風 6624 号)



図一一 湾内の波高分布の型 Ⅳ. 東西二分型 (室戸台風)

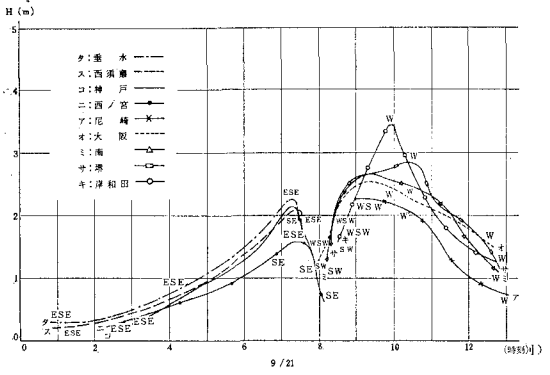


図-12 湾内発生有義波の最大値の分布
(台風 6523 号)

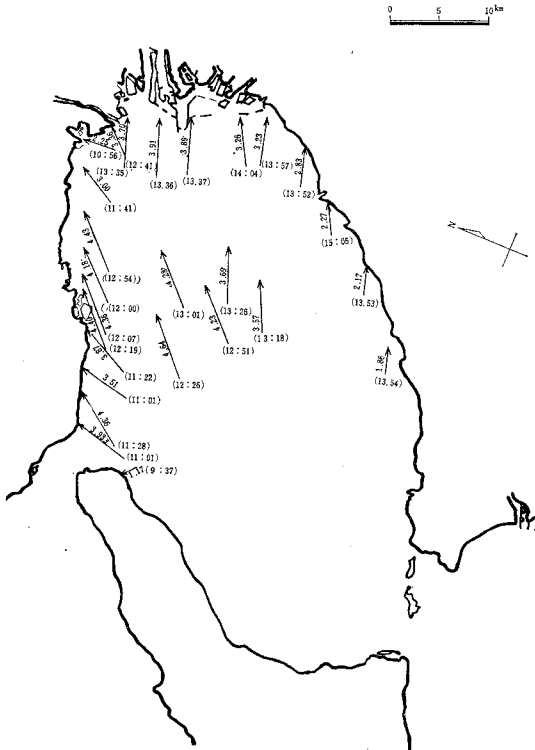
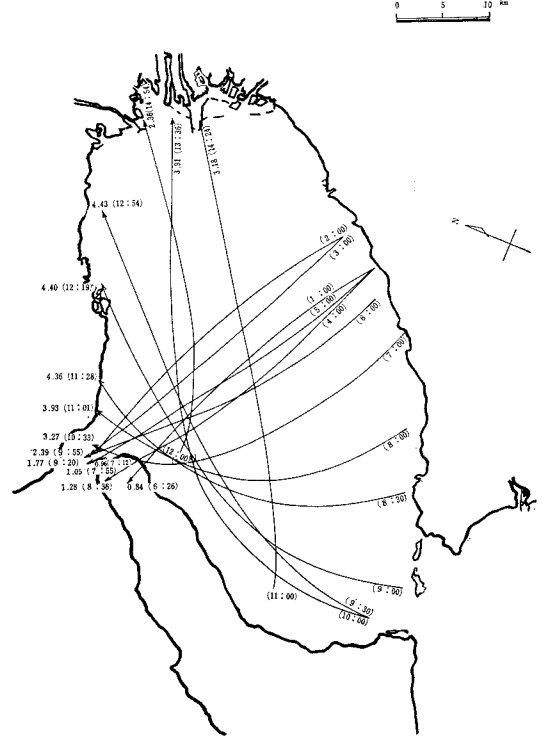


図-13 出発時刻別最大有義波の発達経路
(台風 6523 号)



最大値の分布および各時刻別の最大の有義波の発達経路の様子を図-12, 13 に示した。これらの図から台風 6523 号はその規模 ($\Delta P=64$ mb, $r_0=43$ km) が比較的大きかったこととともに、台風の進行経路が $|R_{\min}|/r_0=1.16$ の位置で NE 方向であったために 30 m/sec 以上の風が 1 時間余り吹き、しかもフェッチが最も長い友ヶ島方向であったことがあげられる。

それでは神戸においては台風の規模と経路によって一般的にどのくらいの波高が生じるかを次に調べてみた。井島他⁽¹⁴⁾によると、外洋における静止台風域での発生有義波高の最大値 H は $A=\Delta P^{3/4} r_0^{1/4}$ に比例し、同じく移動台風では A/V^2 をとることによって H/V^2 と関係づけられる。そこで大阪湾の場合に各台風の湾内発生風波の神戸での最大の有義波高 H が

$$\frac{H}{V^2} = \alpha \left(\frac{\Delta P^{3/4} r_0^{1/4}}{V^2} \right)^\beta = \alpha \left(\frac{A}{V^2} \right)^\beta \dots (17)$$

で表わされると仮定し、 A/V^2 と H/V^2 の関係を示すと

図-14 神戸における H/V^2 と A/V^2 の関係 (大阪湾内発生波)

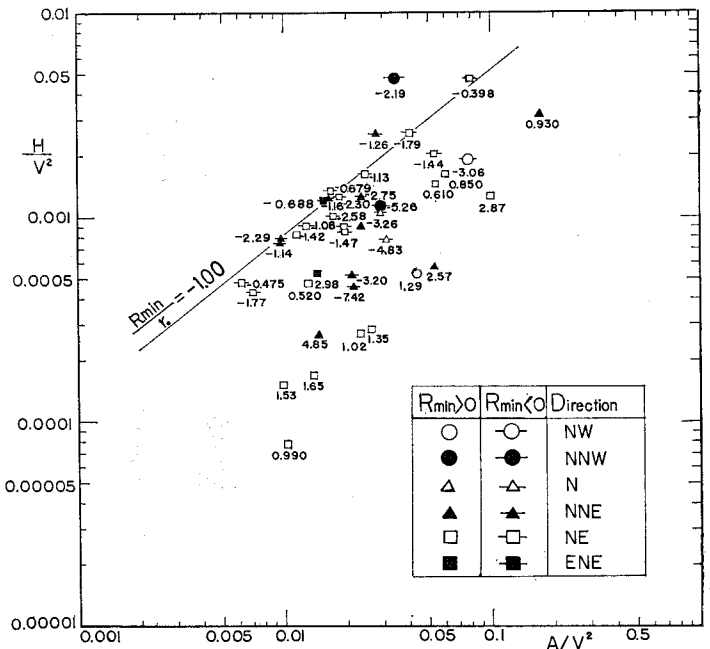
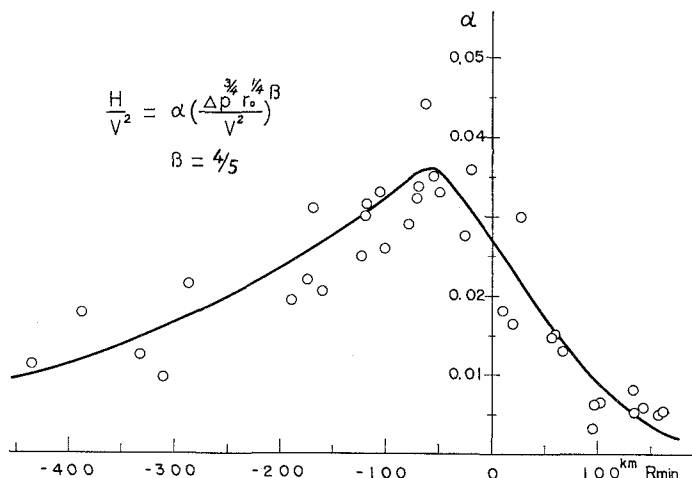


図-14 のようになる。いま進行方向が NNE~NE である台風だけを注目し、図中の数値 $R_{\min}/r_0$ が大体等しいところに直線を引くとその勾配 β は 0.8 である。そ

図—15 α と $R_{\min}$ の関係

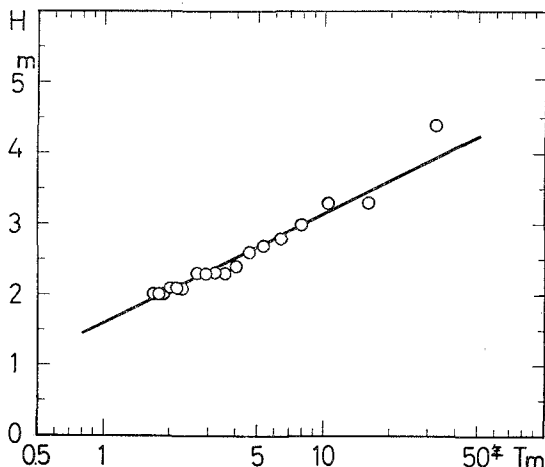
ここでこの β を使って、台風 6523 号の場合に上で述べた通り、各台風が神戸での最大の有義波高 H を生ぜしめるのに最も関係が深いと考えられる $R_{\min}$ に対して式 (17) の α の値を求めたものが図—15 である。図では α の値に約 2 倍の幅があるけれども、 $R_{\min} = -50 \sim -60$ km において α に明らかな極大が現われている。したがって台風 6523 号の場合 $R_{\min} = -50$ km で NE 方向に進んだ台風であることから、神戸にとって統計的に最も危険な経路を通ったといえる。

式 (17) の神戸での最大の有義波高 H (m) は、 $\beta = 4/5$ であることから、 ΔP (mb), r_0 (km), V (km/hr), $R_{\min}$ (km) の単位を使って、結局

$$\left. \begin{aligned} H &= \alpha \Delta P^{3/5} V^{2/5} r_0^{1/5} \\ \alpha &= f(R_{\min}); \text{図—15} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

と表わされる。式 (18) では波高 H は $V^{2/5}$ に比例しているが、実際には進行速度 V が非常に大きくなれば H に上限が現われると考えられる。しかしこの場合、

図—16 神戸における確率波高 (大阪湾内発生波)



図—14 の A/V^2 の小さいところで直線の勾配が 1 より急になるはずであるが、この図からはその点を明確にすることができない。

ここで神戸における大阪湾内発生有義波の最大値から、台風による波に限って将来の確率波高を計算すると図—16 の通りである。有効統計年数 n は 33 年であり、波高が 2.0 m 以上の順位 m が 19 位までの波を表—1 から拾い、再現期間 T_m を次式より計算したものである。

$$T_m = n/m \dots\dots\dots (19)$$

この図で 4.4 m の波高を生じた台風 6523 号の点を除いて直線をあてはめると、神戸では約 50 年に一回は 4.2 m の波高が起こるとみなされる。

なお台風 6619 号では神戸と尼崎で波が実測されたので、推算値を実測値¹⁹⁾と比較してみる。神戸におけるピーク時 9 月 10 日 1 時の階段抵抗式波高計の示した実測値は $H=1.89$ m, $T=4.8$ sec であり、表—1 の計算によるピーク値は 0 時 51 分に $H=1.83$ m, $T=4.7$ sec であった。同資料によるとこの実測波のスペクトルは周期 6 秒に単一のピークがあるのみで、10 秒以上の湾外からの長周期波を含んでいないとみなされる。その意味からも本報告の大阪湾内の推算結果はよく合っていると考えられる。

(2) 大阪湾外からのうねりの伝播について

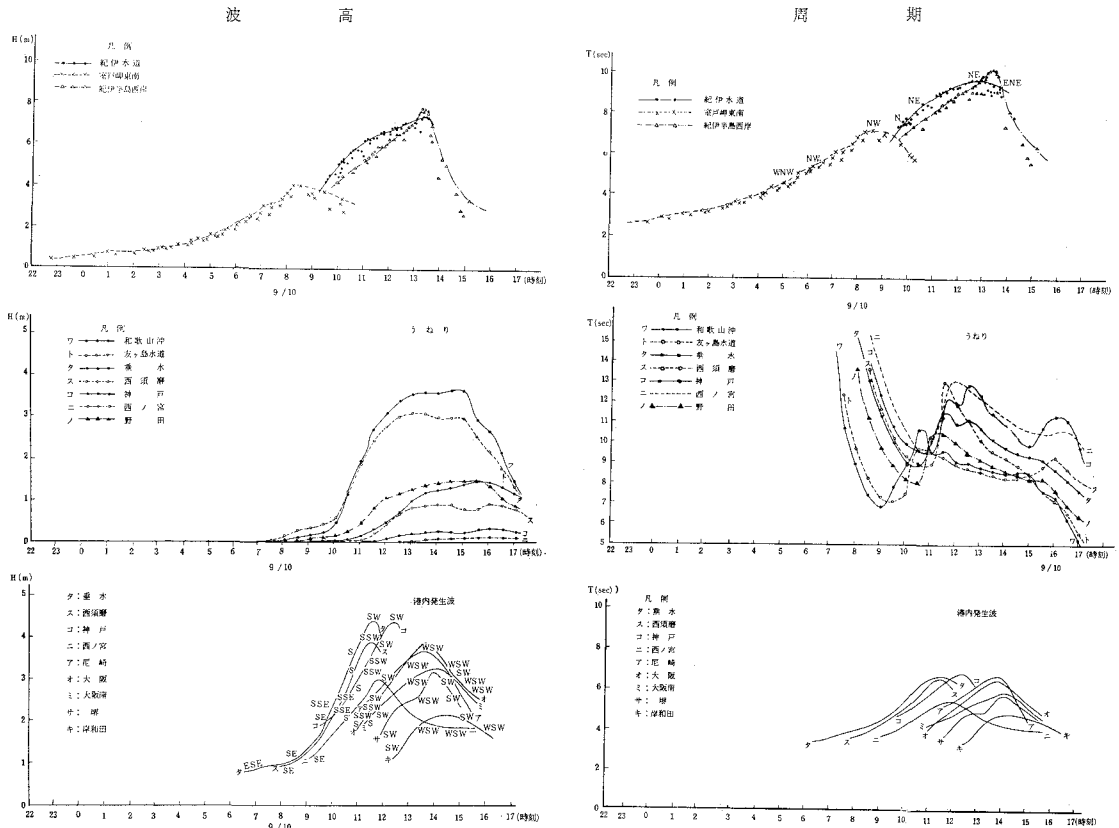
北緯 30.6 度以北の太平洋上で発生した波の紀伊水道からの伝播波の計算結果の一例を、台風 6523 号について湾内発生風波と対照して示したのが図—17 である。台風 6523 号と 6420 号での各地点のうねりの極大値を表—2 に掲げた。これらのうねりのピーク時は湾内風波より 3~4 時間遅れている。その差は湾奥ほど大きい。また湾内に侵入したうねりの周期は、計算範囲内において約 10 秒である。

一方森下¹⁶⁾によると岩屋での台風 6523 号の波の実測値は 9 月 10 日 4 時に $H_{1/3}=37$ cm, $\bar{T}=7.8$ sec, 同日 10 時に $H_{1/3}=425$ cm, $\bar{T}=4.9$ sec である。時間とともに周期が短くなっているのは、4 時頃はうねりが主で

表—2 うねりの推算最大値

地 点	台風 6523 号 (9月10日)			台風 6420 号 (9月25日)		
	起 時	波 高 (m)	平均周期 (sec)	起 時	波 高 (m)	平均周期 (sec)
和歌山 沖	14 30	3.6	10.7	7 30	2.4	7.5
友ヶ島水道	13 00	3.1	8.6	7 30	2.1	7.2
野 田	15 30	1.5	8.4	8 30	1.0	7.3
垂 水	16 00	1.4	8.8	9 00	0.9	8.1
西 須 摩	14 00 16 00	0.9	9.3	10 30	0.9	7.6
神 戸	16 00	0.3	11.5	12 00	0.4	9.5
西 宮	16 00	0.1	10.7	12 00	0.3	10.7

図-17 台風 6523 号のうねりの推算結果



以後周期の短い湾内発生波が卓越してくるためと考えられる。そこで4時の実測値を湾外からのうねりとみなし、図-17とくらべると、本報告の推算ではまだ何らのうねりも到達していない。また同資料に載っている10時の波のスペクトルでは周期10秒に存在するスペクトルのピーク部分の波高は約50cmになると推定される。図-17の推算値では野田におけるこの時刻のうねりの波高は30cmであり、40%ほど推算値が小さい。平均周期も8.2秒で20%小さ目である。

以上の比較の結果、図-17よりもっと早い時期に伝播するうねりの推算値を知りたいところであるが、第一に北緯30°以南の南方洋上にある台風の中心から伝播する早い時期のうねりが計算できないこと、第二に風波は風の方向に進ませているので、台風6420号と6523号の場合のように台風が室戸岬に極く近づく限り、波は西向きに進んで紀伊水道へは早い時期に入っていないことの二点の理由から、ここに求めた伝播時刻が本方法では計算可能な早い時刻の限度である。

しかし京大防災研の白浜における台風6523号の波浪のスペクトル観測値²⁹⁾によると9月8日12時より周期13~14秒の波が一番卓越している。すなわち少なくとも本報告で計算できた時刻よりも1日半位は早くから紀伊水道に長周期のうねりが存在しているわけであって、

このような遠方の台風中心から伝播してくる考えられる波も何らかの方法で計算する必要がある。したがって本報告の計算方法が実際現象を十分に解明しているとはいえないけれども現在の推算法の水準ではやむを得ないものと考えられる。

いずれにせよ室戸岬の西側をN~NE方向に進む台風では、太平洋上で発生したうねりが大阪湾内に伝播してくることは確実である。これは台風6420号その他の似た経路をたどった台風でも6523号の場合と同様のうねりが得られたことからいえる。別に何らかの方法で早い時刻のうねりが計算されたとしても、前出の白浜の観測値からみて、うねりの波高はオーダー的に図-17(表-2)の値程度と考えられる。また、周期は今回の計算範囲のうねりについては約10秒であり、さらに早い時期に発生したうねりも考慮するといっそう長くなると考えられる。

4. 結 語

以上に述べた推算結果は今後実測値によりさらに十分検討されるべきものではあるが、大阪湾における台風時の波浪の特性をある程度明らかにすることができたと思われる。とくに湾内発生風波では、湾沿岸での波高の分布は台風の経路および進行方向に結びつけられ、また神

戸の有義波高の最大値は台風の規模と経路をれば $\alpha \cdot d P^{3/5} V^{2/5} r_0^{1/5}$ (α は 図—15) で求められる。 α は神戸への最近距離 $R_{\min}$ に関係し, $R_{\min} = -50 \sim -60$ km でその値が最大となる。台風 6523 号の異常に高い波高もこの関係式から説明される。この関係を使えば台風の上陸前に風波の大きさを予測し, 対策を講ずるにすることも可能であろう。湾外発生波としては太平洋上で発生したうねりが大阪湾内へ伝播することは明らかとなったが, 南方洋上の台風中心からの早い時期に到達するうねりは求めることができなかった。そのうねりは大阪湾北部で周期が 10 秒以上, 波高は湾内発生波と比べかなり小さいものと考えられる。

なお, 本研究の詳細は“大阪湾波浪の統計的推算”と題して本年度末に第三港湾建設局から報告される予定である。

最後に本研究の実施にあたって種々協力頂いた運輸省第三港湾建設局の各位, とくに神戸調査設計事務所・高橋基次所長および同所・森平倫生前調査課長に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 橋本正義 (1966): “台風による大阪湾の波高の推定法”, 大阪湾における波浪の推定に関する研究, 関西気象協会, pp. 57~70.
- 2) 平沢健造 (1966): “湾外より入って来る波浪を考慮した大阪湾の波高分布の推算”, 大阪湾における波浪の推定に関する研究, 関西気象協会, pp. 71~81.
- 3) 川鍋安次 (1965): “大阪湾の波の解析の一例”, 波浪技術懇親会資料, 神戸海洋気象台, pp. 17~26.
- 4) 中野猿人・川鍋安次・森下敏之・金谷光三 (1966): “大阪湾の波について(第1報)”, 神戸海洋気象台彙報, 176, pp. 1~15.
- 5) 川鍋安次・中野猿人 (1967): “大阪湾の波について (第2報)—台風 6523 号による大阪湾の風と波—”, 神戸海洋気象台研究時報, 19 巻 3 号, pp. 1~13.
- 6) 川鍋安次・鶴岡英彦 (1966): “大阪湾の波について (第3報)—角伝播—”, 沿岸海洋研究ノート, 第5巻2号, pp. 31~35.
- 7) 運輸省第三港建神戸調設・港湾技研水工部 (1968): “大阪湾波浪の統計的推算 (中間報告)”, 三建調設資料 No. 79, 104 pp.
- 8) 同上 (1969): “大阪湾波浪の統計的推算 (中間報告第2報)”, 三建調設資料 No. 103, 154 pp.
- 9) 運輸省第三港建神戸調設 (1967, 1968): “大阪湾波浪推算に使用する台風資料 (その1, 西側を北上した台風)”, 神戸調設資料 No. 71, 368 pp.; 及び “(その2, 東側を北上した台風)”, 神戸調設資料 No. 78, 209 pp.
- 10) 運輸省第三港建 (1965): “第6420号台風に関する調査”, 204 pp.
- 11) 井島武士 (1968): “波浪の数値予測”, 1968 年度水工学に関する夏季研修会講演集, A. 海岸港湾コース, 土木学会水理委員会, pp. 2-1~2-30.
- 12) Myers, V.A. (1954): “Characteristics of United States Hurricanes Pertinent to Levee Design for Lake Okeechabee, Fla.”, Hydrometeorological Rep. No. 32, Weather Bureau, U.S. Dep. Commerce, Wash D.C., 106 pp.
- 13) 宮崎正衛 (1965): “鹿児島港および八代海高潮の総合調査報告”, 気象庁, 第四港建, 129 pp.
- 14) 井島武士・副島 毅・松尾隆彦 (1967): “数値計算による台風域内の波の分布について—海洋上における台風の場合—”, 第14回海岸工学講演会講演集, 土木学会, pp. 29~38.
- 15) Wilson, B.W. (1965): “Numerical Prediction of Ocean Wave in the North Atlantic for Dec., 1965”, Deut. Hyd. Zeit., Jah. 18, Heft 3, pp. 114~130.
- 16) 森下敏之 (1968): “台風 6420 号および 6523 号に伴う大阪湾の波浪について”, 大阪湾における波浪の推定に関する研究, 関西気象協会, pp. 21~34.
- 17) Pierson, W.J., Jr., G. Neumann, & R.W. James (1955): “Practical Method for Observing & Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra & Statistics”, U.S. Navy H.O. Pub. No. 603, 284 pp.
- 18) 高井俊郎 (1969): “防波堤開口部へ斜めに入射する波の回折図”, 港湾技研資料 No. 66, 42 pp.
- 19) 第三港建神戸調設 (1967): “昭和 41 年度管内波浪調査報告書 (台風 6619, 6624 号)”, 74 pp.
- 20) 国司秀明・西 勝也・今里哲久 (1961, 1962): “白浜海洋観測塔における波浪の研究 (I) 及び (II)”, 京大防災研年報, 第9号 pp. 677~684, 第10号 B pp. 313~320.