

別府湾における台風時の波浪推算について

堀 川 清 司*・西 村 仁 嗣**
小 沢 保 臣***・宮 本 幸 始****

1. 緒 論

台風域内の風速ならびに風向は台風の進行にともなうて時々刻々変化し、また平面的にも一様ではない。このような風の場合で生ずる海の波を数値的に解析するのに波のスペクトル構造を導入することも考えられているが¹⁾、ここでは有義波という単一の波によって水面変動の特性を表現する方法が採られている。

台風域内の波浪推算法については井島らが研究、開発を試み、SMB 法その他の図式解法等に比して数段階進んだ形の計算法を提案している^{2), 3)}。またこの計算法を実際の海に適用して、ある程度の成果をあげた例も報告されている。しかしながら、地形境界によって周囲の限定された海域における波浪の分布を推算する場合、従来行なわれている数値計算の手法をそのまま踏襲することは必ずしも有利ではない。われわれはすでにその問題点を指摘し、内挿計算の積み重ねによって風および波の平面的な分布を一定の時間間隔で計算する方式を提案した⁴⁾。同時にまた、波の発生、発達、減衰の各領域を通じて統一的な計算法を採用することにより、計算手順の簡便化を図った。ここでは、実際の応用例として別府湾ならびに周防灘を含む海域にこの計算法を適用し、計算結果からその実用性を検討するとともに、当該海域における台風時波浪の特性を論ずる。

以下の各節に見られる数値計算は主として大型電子計算機システム IBM-OS 360 によって行なわれたものであり、一部に中型電子計算機 FACOM 230-25 システム BÖS が援用されている。

2. 台風モデル

台風域内の気圧分布を与える経験式としては Myers の式⁵⁾、高橋の式⁷⁾、藤田の式⁷⁾等が著名である。Myers の式は

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

他はいずれも

$$P = P_c + \Delta P \cdot [1 - \{1 + (r/r_0)^n\}^{-1/2}] \dots \dots \dots (2)$$

なる形をしている。ここに、 P は気圧、 P_c は台風中心

における気圧、 ΔP は中心示度の深さ、 n は定数であり、 r は台風中心から測った距離を表わしている。 r_0 の意味は式によって微妙に異なるが、概して台風の半径方向の規模を与える指標である。 P_c については比較的正確な資料が得られるが、 ΔP 、 r_0 については天気図に描かれた等圧線をもとに curve fitting を行なって定める以外にない。実際にはいずれの式によっても単一の ΔP 、 r_0 あるいは n で天気図の気圧分布を再現することは多くの場合不可能である。しかしながら、特に海洋上の台風については天気図の等圧線自体が比較的乏しい資料に基づいて描かれたものであることを考慮し、われわれは井島らにならって Myers の式 (1) を採ることとした。

$$\Delta P = 1010 - P_c \text{ (mb 単位)} \dots \dots \dots (3)$$

と仮定する。また、天気図上で確実にしかも精度よく得られる等圧線として 1000 mb のものを選び、台風中心からこの等圧線までの平均的な距離を r_{1000} とすれば、式(1)より

$$r_0 = r_{1000} \ln \frac{1010 - P_c}{1000 - P_c} \dots \dots \dots (4)$$

こうして気圧分布のモデルが定まれば、傾度風速 $U_1(r)$ は、

$$U_1(r) = 0.6 \left\{ \frac{\Delta P}{\rho_a} \cdot \frac{r_0}{r} e^{-r_0/r} + \left(\frac{cr}{2} \right)^2 \right\}^{1/2} - \frac{cr}{2} \dots \dots \dots (5)$$

また、場の風 $U_2(r)$ は、

$$U_2(r) = 0.6 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} \cdot V \dots \dots \dots (6)$$

で与えられる。ここに、 ρ_a は空気の密度、 c は Coriolis の係数、 V は台風の進行速度である。傾度風は等圧線に対して反時計方向 30° 内側に吹き込み、場の風は台風の進行方向に吹くものとして、これらをベクトル的に加算すれば合成風速 U および風向 θ が得られる²⁾。

以上によって半径方向の傾度風速分布、同心円内の合成風速ならびに風向の分布を計算すると図-1 のようになる。いま、場の風は傾度風速に比例するものと考えているので、半径方向の合成風速分布もまた 図-1(a) のような形をしていることになる。 $r=r_0$ の近傍で最大値に達した風速は台風中心から離れるにしたがってゆるやかに減少する。

さて、波浪の推算に先立ち、台風の特性について若干

*正会員 工博 東京大学教授 工学部

**正会員 工修 東京大学講師 工学部

***正会員 東京大学工学部研究員

****学生会員 東京大学大学院 工学系研究科

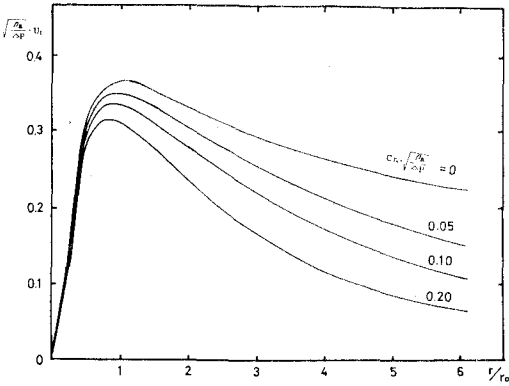


図-1(a) 半径方向の傾度風速分布

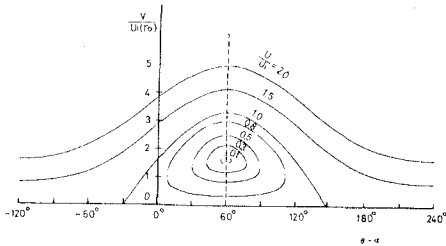


図-1(b) 同心円内の合成風速分布

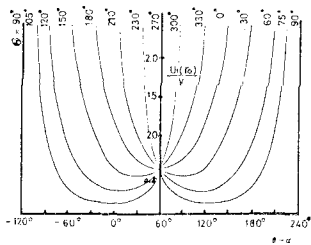


図-1(c) 同心円内の合成風向分布

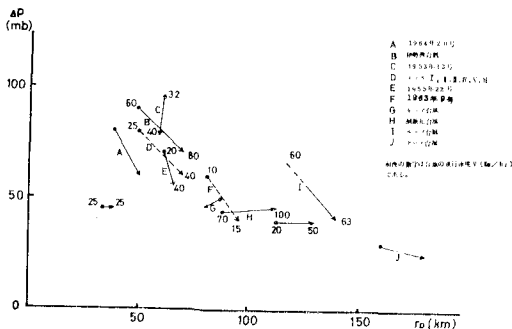


図-2 台風 の 特 性

の検討を試みることにしよう。図-2 は過去の代表的な台風が日本に上陸する直前と直後の ΔP , r_0 を式 (3), (4) によって求め、これらを一括して図示したものである。図中の数字は各時点における台風の進行速度 (km/hr) を示している。 ΔP と r_0 の間には、かなり明確な相関が認められる。すなわち、台風を中心示度が低いほど r_0 は大きい。また、台風は上陸することによって弱

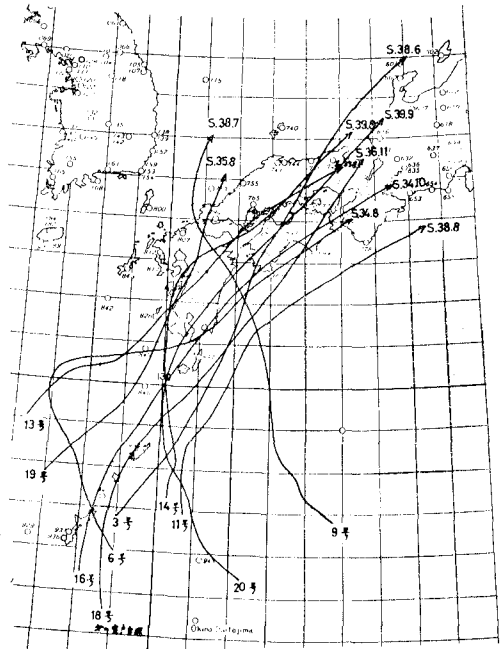


図-3 台風 経 路 図

まり、 r_0 が大きくなると同時に進行速度が大きくなる傾向がある。しかし、図-2 から見た限りでは、 ΔP もしくは r_0 と台風の進行速度 V との間に直接の相関は認められない。

一方、図-3 は別府湾付近を通過した台風の経路図である。これから明かなように、大多数の台風はわれわれの問題としている海域付近でおよそ北東の方向に進んでいる。昭和 15 年から昭和 44 年に至る 30 年間の該当する台風は主なものだけで 46 にのぼるが、そのうちこの海域付近で北東に進んだものが 29 と大部分を占め、ほぼ北進したものが 13、北西に進路をとったものは 4 にすぎない。

以上の結果に基づいてわれわれは 図-4(a) に示した 6 つのモデル台風を設定した。これらはかなり規模の大きい台風が種々の経路をとって別府湾付近を通過する場合を想定したものである。

さらに、図-4(b) は昭和 38 年 9 号台風の規模ならびに経路を示したものである。既往の台風例としてこれを選んだのは、風および波浪の実測資料が残されていて計算結果の検証に好都合と思われたからである。

3. 波浪の推算方法

風による波の発達量を算定するための基本式としては Wilson の式を用いる。これは Wilson が深海波に対する自らのフェッチ・グラフを数式化したもので、一定風速 U のもとに波が発生し、発達しながら伝播するとき、有義波高 H および有義波周期 T をそれぞれ吹送距離 F

の開数として与えている。すなわち、

$$\frac{gH}{U^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (7)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = 1.37 \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \quad (8)$$

また、群速度 C_g は一般に水深を D 、波長を L 、波速

を C として、

$$C_g = n \cdot C = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{4\pi D/L}{\sinh(4\pi D/L)} \right\} \cdot \times \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi D}{L} \dots\dots\dots (9)$$

$$L = CT$$

で与えられる。

波の発達量の算定法は従来⁹⁾の方法と全く同様である。風速 U_1 、風向 θ_1 なる風に送られて波高 H_1 、周期 T_1 なる波がある点に到達し、ここで風速が U_2 、風向が θ_2 にそれぞれ変化したとする。この点を出発する波は方向分散を起こし、風向 θ_2 と一致する成分だけが発達すると考える。そこでこの点を出発する波高 H_1' を

$$H_1' = H_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) \dots\dots\dots (10)$$

で与える。ただし、周期はそのまま変化しないものとする。 U_1 、 U_2 等の数値を式 (7) に代入すれば仮想的なフェッチ F_1^* が得られる。この後、波は風速 U_2 なる風に送られて距離 $4F$ だけ進む。したがって、今度は式 (7) において $F = F_1^* + 4F$ 、 $U = U_2$ とすることにより、発達後の波高 $H = H_2'$ を得る。

次に底面の摩擦損失による波の減衰量を推定する。単純に、波の進行にともなう波高の減衰率 $(dH/dF)_-$ が当初の波高に比例するものと考えれば、

$$\left(\frac{dH}{dF} \right)_- = - \frac{K_1^2 (1-A)^2}{A(1-\sqrt{1-A})} \cdot \frac{gH}{U^2} \dots\dots (11)$$

ここに、 $K_1 = 0.004$ 、 $A = \tanh 0.578 (gD/U^2)^{0.75}$ 、 D は水深である。この比例定数は、井島の式から定常状態に対応する gH/U^2 を求め、このときの波高の増加率と減衰率が絶対値において一致するように定めた。こうして変形後の波高 H_2 は最終的に、

$$H_2 = H_2' + (dH/dF)_- \cdot 4F \dots\dots\dots (12)$$

となる。

周期についても全く同様である。

なお、われわれが対象としている海域は豊後水道と佐田岬によって外海と遮断されているので、外海から大きなうねりが伝播して来る可能性はほとんどない。また、台風域に比して海域が小さいので内海におけるうねりも考慮外としてよいであろう。

さて、図-5 は本計算の対象となった海域を示したものである。ここでは計算領域を格子で覆い、一定の時間間隔で全格子点における風および波の状況を計算することを考える。ある格子点における波高ならびに周期を計算するためには、まずその付近の風向および波の群速度を調べて、計算時間間隔 $4t$ 秒前にその波がどこに位置していたかを推定する必要がある。前ステップにおける波の位置が定まれば、その点の波高、周期、水深等は周囲 4 点における値から内挿によって求めることができる。これらの値が算定されれば上述の方法にしたがって、容

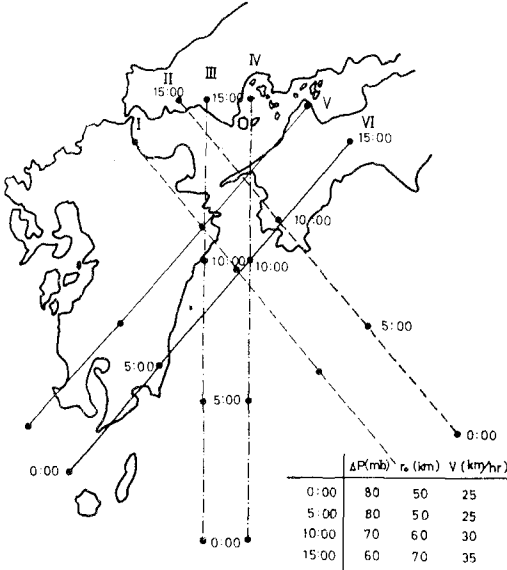


図-4(a) 台風モデル I~VI

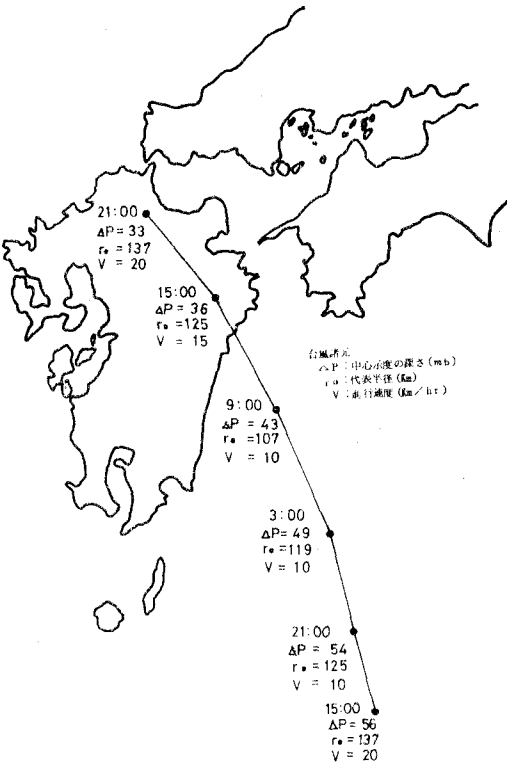


図-4(b) 昭和 39 年 9 号台風

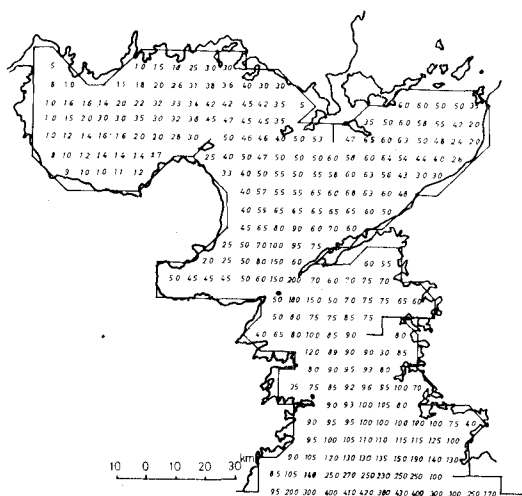


図-5 水深および地形境界

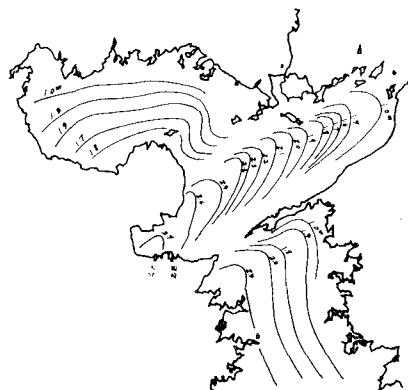
易に $4t$ 秒後のステップにおける格子点上の波の状況が知られる。ただし、この場合計算は一定の時間間隔で進められるので、フェッチの増分 $4F$ が過大となり、地形境界を横切るような波が計算される可能性がある。本計算においては格子間隔を 6 km, 時間間隔を 10 分としたが、これらの決定に際しては上記のような不備を生ずることのないよう特に注意せねばならない。

図-5 は各格子点における水深を海図から読みとったものであり、その基準面はほぼ最低低潮面に一致している。波浪推算においては最も波の発達し易い条件として

朔望平均満潮位をとるのが妥当と思われるので、図-5 の水深に対して一様に 2 m を加え、さらに気圧低下にともなう海面の上昇量をも加算した。

4. 推算結果

まず、波向線に沿って 1 つの波を追跡する方式で井島の波浪推算式を用いた場合と、前節において述べた方法にしたがう場合とで計算結果がどの程度異なるかを調べるために、これら 2 つの方法を用いて 9 号台風時の波浪を試算した。別府湾南岸でほぼ最大波高を生ずる時点における波高分布が図-6 にそれぞれ示されている。同図 (a) は前者の手法によるものであり、(b) は後者の手法によるものである。これらを比較すると最大波高を生ず



る時刻がいくぶんずれているが、波高の大きさについても、その分布の状態についても、ほとんど完全な一致が見られる。

ある地点における風向は台風の進行経路と密接な関係をもっている。9号台風の場合、大分県一帯で北東方向の風が長時間にわたって継続し、このとき別府湾南岸は常に海域の風下側にあるため、一定して北東方向の強い風が続く。特にわれわれが対象としている海域は北東—南西の方向に最大のフェッチをもっているので大きな波はこの時期に集中する。

なお格子点法による場合、初期波高および周期をすべて0としたが、計算開始時刻を様々に変えて試算を行なった結果、その影響は最悪のケースでも計算開始後6時間で解消することが確認されている。

図-7 は9号台風時の風速および風向について、大分

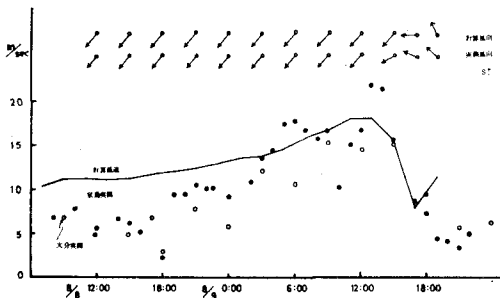


図-7 風の記録 (9号台風, 大分)

地点の実測値と計算値を比較したものである。図からわかるように、実測された風速は大きく変動しているのに対し、計算値では時間的な変化がゆるやかである。前者は陸上における実測の結果であるため、地形的な影響も受けていると思われる。計算上の最大風速は 18 m/sec と実測値よりもいくぶん小さいが、風向に関しては両者の間によい対応が見られる。

同じく図-8 は9号台風時の波高および周期について大分地点の実測値と計算値を比較したものである。計算上の風速変化がゆるやかであるため、波高の計算値は風

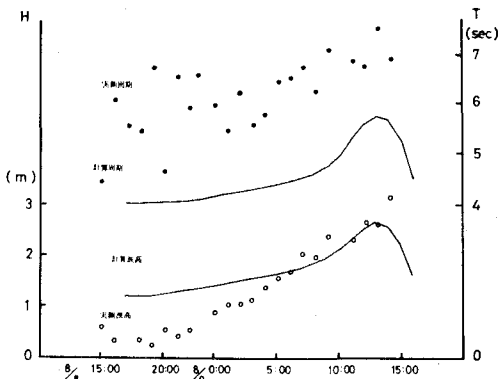


図-8 波高および周期の経時変化 (9号台風, 大分)

速の経時変化と類似の傾向を見せている。計算上の最大有義波高は大分で約 2.7 m と実測値に比して 0.5 m ほど小さくなっており、また有義波周期の最大値については計算値の方が実測値より 1 sec 以上も小さくなっている。ただし、このような差異を生じた原因の一端は実測値の方にもあり得る。ここに示した実測値は比較的短周期の波を水圧式の波高計で測定したものであり、また有義波高ならびに周期を求めるときに、山もしくは谷に着目して一波一波を識別しているため、波高、周期ともに過大評価されている可能性がある。このほか最大波高の起時が坂の市から鶴崎、さらには大分へと徐々に遅れる点も実際の状況とよく一致している。

さて、モデル台風に関する推算結果の一部が図-9 に

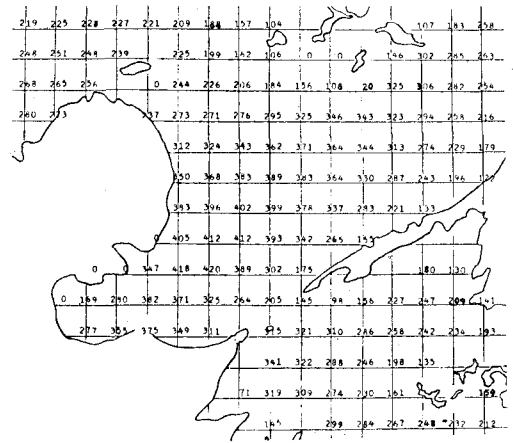


図-9(a) 波高分布 (モデル I, 12 時)
(単位 cm)

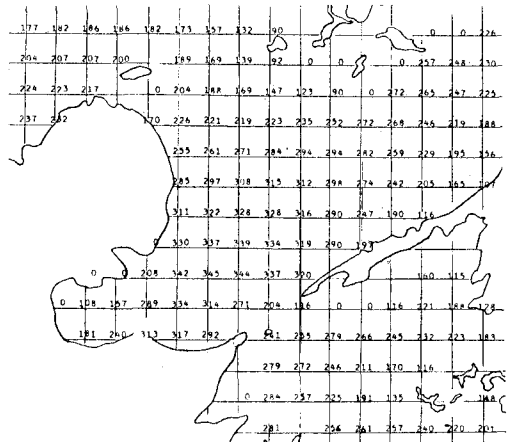


図-9(b) 波高分布 (モデル III, 11 時)
(単位 cm)

示されている。これらはいずれも別府湾南岸にほぼ最大の波が到達する時刻における波高の平面分布を示したものである。一方、大分ならびに鶴崎地点におけるモデル台風ごとの波高変化の状況を比較したのが 図-10 である。この地区ではモデル II の場合波高が最も小さく、モ

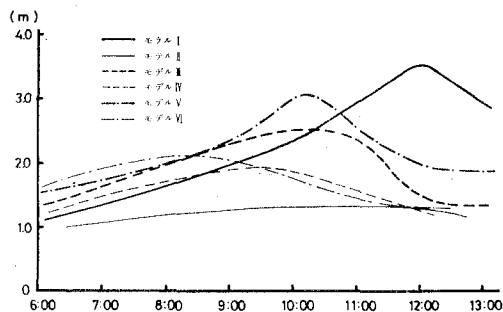


図-10(a) 波高の経時変化(大分)

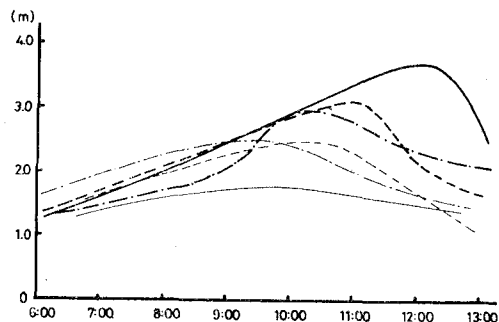


図-10(b) 波高の経時変化(鶴崎)

デル IV, VI の場合も最大有義波高 2.6~2.7 m 程度でそれほど大きくない。モデルⅢはモデルⅣよりも大分寄りを北上するケースで、この時の最大波高は 3.15 m とかなり大きくなっている。モデルⅠは台風 9 号に近いコースを北西方向に進む台風であるが、この場合最大波高は大分で 3.55 m, 鶴崎で 3.75 m と全ケースのうち最も大きい。

いずれの場合も台風中心が北緯 33° 付近にあるとき最大の波高を生じており、この時点における台風の位置および進行方向が別府湾の波高に大きく影響するようである。しかしながら、当該海域の風波の大小は風速の絶対値のみならず、風向およびそれによって定まる有効なフェッチの長さにも関係する。台風の通過経路はこれら双方に影響するので、そのわずかな相違によって波高が大きく異なり、こうした因果関係を一般的に論ずることは困難である。風速のみについて考えれば、別府湾の西側を通過する台風の方が危険であるが、この場合北もしくは北東の風が吹くとは限らない。また松島付近から別府湾にかけての海域の全長が有効なフェッチとなり、波がほとんど直進しながら強風を受けて発達すれば、きわめて大きな波が別府湾を襲うことは当然である。しかしながら考え得る台風の経路は限られているので、そのような情況は生じ得ない。

前にも述べたように、別府湾付近では北東方向に進む台風が最も多いが、これらのケースでは概してこの海域の波高は小さい。最も危険な台風はモデルⅠのように別府湾の西側を北西の方向に進むものであるが、このコー

スをとる台風は数少なく、しかもほとんど 7~8 月に発生しているのでその規模は比較的小さいようである。

5. 結 論

以上においてこうした波浪推算法の妥当性が検討され、また別府湾内外における風および波の特性が調べられた。この計算法の最も大きな特徴は、波高および周期の平面分布がより直接的に得られる点にある。波向線に沿って波を追跡する方法では時間的、場所的に十分密な計算値を得るために、大なり小なり人間の判断を必要とし、計算結果の処理にも多大の労力を要する。反面、格子に縛られた計算法では計算ケースを人為的に調節することが困難であるため、たとえば特定地点に到達する波のみを求めるような場合にはかえって無駄な計算が増える可能性がある。さらに、これを広い海域に適用する際は、台風の移動にともなう計算領域内の格子点を入れかえて行くような操作が必要となる。これらの点を考慮した上で、適宜計算方式を選択する必要がある。

現段階においてはこのような計算手法の問題もさることながら、実際の風場の場をいかにして正確に表現するか、あるいはまた風速および水深の変化にともなう波浪の変形をいかに評価するか、といったより基本的な問題が今後に残されている。

本計算のためのプログラムを開発するにあたり、九州大学工学部 井島武士教授の提示された計算法、および運輸省港湾技術研究所水工部における計算例を参考にさせていただいた。また、同研究所水工部 副島毅技官にはいくつかの計算上の問題点について貴重なご教唆をいただいた。ここに記して謝意を表する。

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, New York Univ., School of Eng. and Scie., Geophys. Scie. Lab., TR-67-5, 1967.
- 2) 井島武士・副島 毅・松尾隆彦：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, 1967.
- 3) 井島武士：波浪の数値予測, 水工学に関する夏期研修会講義集, 1968.
- 4) 運輸省 第三港湾建設局神戸調査設計事務所, 運輸省港湾技術研究所水工部：大阪湾波浪の統計的推算, 1970.
- 5) 堀川清司・西村仁嗣・小沢保臣・宮本幸始：内海における台風時の波浪推算について, 第26回年次学術講演会講演集, 1971.
- 6) Myers, V.A.: Characteristics of United States Hurricanes Pertinent to Levee Design for Lake Okeechobee, Fla., Hydrometeorological Rept. No. 32, Weather Bureau, U.S. Dept. Commerce, 1954.
- 7) 増田善行・笠原 彰：台風論, 気象学講座, 第11巻, 1958.
- 8) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室：別府湾の波浪推算に関する報告書, 1971.