

数値計算による台風域内の波の分布について (II)

— 実際の台風による検討 —

井 島 武 士*・田 淵 幹 修**

1. まえがき

前報告（数値計算による台風域内の波の分布について
一海洋上における台風の場合一）において、有義波の概
念により海洋上の台風域内の波浪の分布を求める数値計
算法を提案し、台風域内の波の分布の特性を述べた。

本論文では、この数値計算法の信頼性を確かめるため実測による波浪分布が得られている昭和10年9月三陸沖を北上した三陸沖台風（仮称、以下本論文ではこの名称を用いる）について数値計算を試みるもので、その計算結果を、とくに風波について述べる。

また、前回の報告における計算は、緯度 30 度付近の台風についての風速分布によるものであったため、今回、北緯 20 度および 10 度に対する風速分布を用いて波浪分布の計算を追加したので、この結果もあわせて報告する。

なお、本報告においては、前掲論文を I で示す。たとえば、I-2.、式(I-2)等はおのれの前掲論文の第2節、式(2)等を意味するものとする。

2. 波の計算理論

波の数値計算の方法は I-2. で述べた仮定のもとに行った。ただし、波形勾配 H/L が碎波状態になる 0.1 以上の時は、前回はうねりとして進行するとして風波としての計算を打ち切っていたが、今回は $H=0.1L$ を限界波高として採用した。しかしこの条件は実際の計算過程ではほとんど起こらない。

台風域内のある点から発生し、風を受けながら進行しつつ発達する特定の波についての追跡計算法は大略次のようにある。

いま a 点を出発した波が a 点での風速 U_a を受けて風向 β_a の方向に微小フェッチ dF_a 進んで b 点に達し、波高 H_b 、群速度 C_{gb} となっていると考える。 b 点まで β_a の方向に進んでいた波は b 点で進行方向を変え、この点の風の主方向 β_b の方向に進む。このとき β_b の方向に準む波の波高 H_b' は式 (I-1) の仮定より

で与えられ、群速度の値は変化しない。ここで b 点における波は、波高および群速度が 0 の状態から一定風速 U_b を受けて発達した結果と考えると、波高 $H_{b'}$ 、群速度 C_{gb} になるのに必要な相当吹送距離 F_{Hb} 、 F_{Cb} は式 (I-2) を用いるときは、

$$F_{Cb} = \frac{U_b^2}{g \cdot K_2^3} \left\{ \frac{1}{\{1 - (C_{gb}/K_1 \cdot U_b)\}^{0.2}} - 1 \right\}$$

$$F_{Hb} = \frac{U_b^2}{g \cdot K_4^2} \left\{ \frac{1}{\{1 - (g H_b'/K_3 \cdot U_b^2)^{0.5}\}} - 1 \right\}$$

.....(2)

となる。点cにおける波の群速度、波高は、この相当吹送距離がさらに微小 フェッチ $4F_b$ だけ長くなった時の値に等しいと考えると、式(I-2)において風速 U の代りに U_b 、フェッチ F の代りに $(F_{Cb} + 4F_b)$ または $(F_{Hb} + 4F_b)$ とおいてやればよいことがわかる。すなわち、

$$C_{gc} = K_1 \cdot U_b$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{1}{\{1 + K_2(g \cdot (F_{cb} + 4F_b) / U_b^2)^{1/3}\}^5} \right\}$$

$$H_c = \frac{K_3 \cdot U_b^2}{g}$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{1}{\{1 + K_2(g \cdot (F_{Hb} + 4F_b) / U_b^2)^{1/2}\}^2} \right\}$$

.....(3)

で c 点の群速度と波高が与えられる。これは式(I-11), 式(I-12)に相当し, 近似式を厳密に解いた式におきかえたものである。

3. 三陸沖台風の波浪追算

(1) 三陸沖台風（昭和10年9月、低気圧番号27）

昭和 10 年 9 月 25 日朝、小笠原島の南東 40 km 付近にあって 720 mmHg に発達し、以後図-1 に示すコースを北上した。この台風が金華山東方 200 km 付近に達した 26 日 9 時頃から、北海道の南方海上で行動中の第 4 艦隊がこの台風圏に入り、悪状況の中で台風域の気象および波浪の観測を行なっている。図-1 に示している▲印が 26 日 12 時における艦隊各群の位置である。この時得られた風および波浪の観測記録は整理されて昭和 28 年「水路書誌」(812 号) に発表された。これらは、実測値の得られた時点では台風の進行速度が 70 km/hr 以上となっているけれども、1 個の台風についてほぼ完全な

* 严会员 丁博 九州大学教授 工学部 水工土木工学科

** 正会員 九州大学助手 工学部 同

風や波浪の分布が得られているという点で、海洋上における台風圏内の風や波浪の分布を与える貴重な資料となっている。図-2, 図-3, 図-4はそれぞれこの時得られた風、波浪、うねりの分布図である。図-3, 図-4における数字は当時の波浪、およびうねり階級で、波浪については()内に妥当と考えられる相当有義波高をメートル単位で示した。

艦隊の報告によると、艦隊が台風圏内に入り風速が25 m/secに達した頃から海面の状態は急激に悪化し、右半円でとくに波は大きく、右後半円に入ると波高15 m以上、波長200~300 mの大波が現われている。後半円の波の衰えは遅く、かなり長い時間大波が続き、時間を

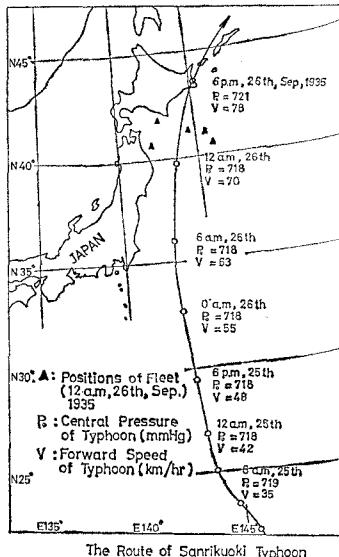


図-1

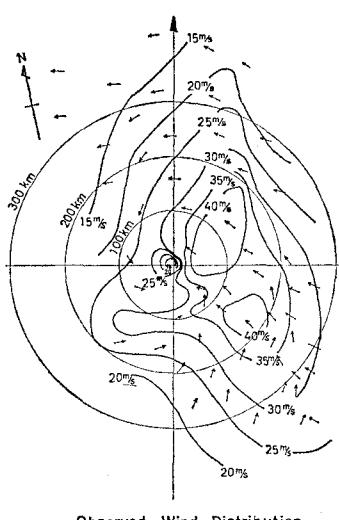
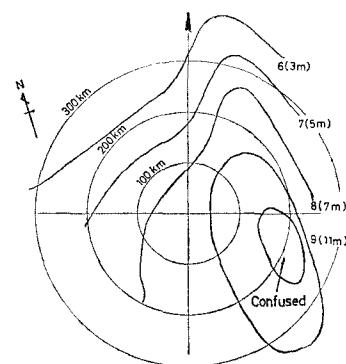
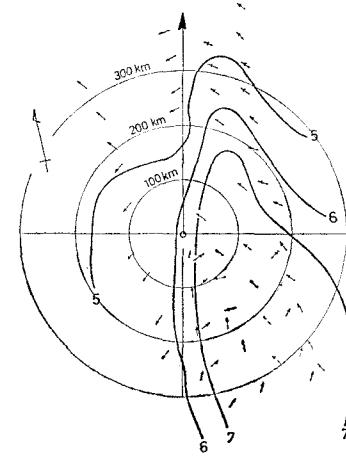


図-2



Observed Distribution of Wind Wave
(Number outside parenthesis is wind wave scale, number inside parenthesis is equivalent significant wave height)

図-3



Observed Distribution of Swell
(Numbers are swell scale)

図-4

経るにしたがって顕著な三角波が現われている。またこの台風の本土への影響としては当時の「気象要覧」(中央気象台)によると、宮古測候所報告として、岩手県宮古付近の三陸海岸に午後0時すぎ(時刻は北へ行くほど遅れている)急激に激浪が襲い、その波高は7~8 m、波長300 mにおよび、2~3時間で急速に衰えたとされている。

(2) 数値計算の条件と方法

三陸沖台風の波浪の追算を行なった計算条件と方法を簡単に示すと次のようである。

a) 台風は25日午前6時頃からゆるやかなカーブを描いて次第に加速しながら北上した。計算には進行経路を直線におきかえ、進行速度は一定の場合とその変化を考慮した場合について行なった。台風の進行速度 V (km/h) は、23日午前6時を時刻 t (hour) の原点にとると、

25日から27日の間は次式で表わすことができる。

$$V=0.12 t^{1.466} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

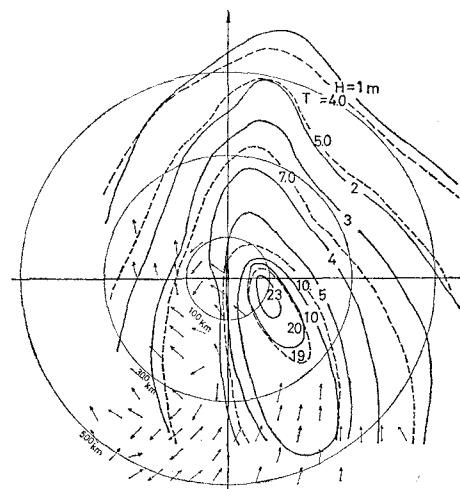
b) 風速および風向は図-2に示した実測風分布を用い、計算範囲を十分に取るため周辺部の分布は傾度風による計算値を考慮して補った。実際の台風域内の風の分布は、進行とともに変化しているはずであるが、この計算では、その変化は考慮していない。計算範囲は台風中心より前方 600 km、後方 450 km、進行方向に向って右方 600 km、左方 300 km を取り、風のデータはこの計算領域を縦横 50 km ごとに区切った格子点上で与えた。

c) 波の出発点は上記の格子点とし、台風の進行速度一定の計算では 25 km ごと、進行速度の変化を考慮した計算では 50 km ごとに区切った小領域について、風波およびうねりおののおのの卓越波を求めた。

d) 微小フェッチ ΔF は 10 km としたが、 C_g が小さい時は ΔF を進行するのに要する時間 Δt が大きくなり、この間の風速、風向を一定とする仮定が近似されなくなるので、 $\Delta F/C_g$ が 25 分を越える時は、 $\Delta F=C_g \cdot \Delta t$ を取り Δt を 25 分とした。また Δt の計算はシンプソンの積分公式を用いた。

(3) 波浪の追算結果

図-5 は台風の進行速度を一定 $V=73 \text{ km/h}$ (9月 26 日の平均進行速度。「気象要覧」による) とし、式(I-2)を用いて得た風波の分布図で、波高を実線で、周期を破線で示している。図-6 は台風の進行速度を考慮した場合であるが、この場合は一定速度 $V=40 \text{ km/h}$ で進行し定常に達している波浪分布を 25 日 12 時に与えて以後 4 時間ごとに波を発生させ、26日 9 時の風波の分布

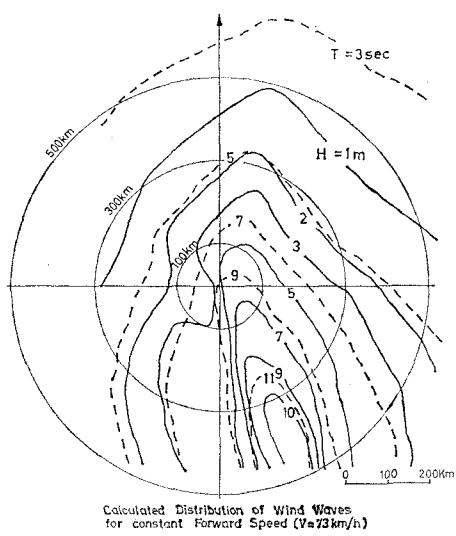


Calculated Distribution of Wind Waves for increasing forward Speed
— Wave Height Wave Period
← Swell Direction

図-6

を求めたもので、実線は波高、破線は周期を示す。矢印はうねりの進行方向を示し、矢印の分布範囲が計算によるうねりの現われたところである。

図-3 の実測波浪分布図は風波とうねりがともに入っているとみられ、図-4 のうねりの分布図でも、これらの分離は必ずしも明確になされていないようである。とくに図-4 で波向が風向と一致しているものは風波とみなすのが妥当であろう。艦隊が台風圏に入ると同時に波浪が大きくなつたという報告からも推定されるように、台風の前半円では顕著なうねりは現われていないと考えられるが、計算結果でもそのとおりである。最大波高の現われる場所は、実測では台風の進行速度一定の場合の計算結果よりもかなり前方に出ている。これは台風の進行速度が速く、しかも加速しているため台風の前面に出る成分波がなく、波の速度分散と台風の進行速度の加速の関係で、波のもつエネルギーの密な部分が前方に出て来たためであると考えられる。この現象は、台風の進行速度を実際の台風に合わせて変化させた計算では台風とともに進む周期(波速)の大きい波の存在で説明され、最大波高域の現われる場所は計算値と実測値はほとんど一致している。この最大波高域を成す波はほぼ台風の進行と一致して進んできた波で、その波高、周期、吹送距離などは周辺部と不連続的に大きな値を示している。実測波浪分布図で、台風の右後面の等波高線が長く後方に流れているのは台風の進行にとり残された波によるものと考えられるが、計算値ではこれがうねりとして現われる。左後半円では台風の速度変化を考慮した計算で顕著なうねりが現われ、風波と合成した時、実測波浪とよく一致する分布を与えるが、このうねりはまた、三陸海岸を襲った激浪とその生起時刻、継続時間が一致し、また



Calculated Distribution of Wind Waves for constant Forward Speed ($V=73 \text{ km/h}$)
— Wave Height Wave Period

図-5

波高も近い値を示している。このようなうねりは台風の進行速度を一定とした計算では現われなかった。

実測波高の絶対値は波浪分布が波浪階級で与えられており、また報告されている波高の値も不規則波を艦上から目測したもので、とくに有義波との関係ははっきりしない（とくに目測による周期（波長から推定）は信頼性に乏しく、ほとんど有義波との比較は不可能である）。したがって図-2の括弧内に示した有義波高は概略の推定値であるが、計算値との一致は良好である。したがって今回の計算によって、Iで提案した数値計算による波浪推定法がいくつかの仮定を導入しているにもかかわらず、工学的にはかなり満足できる精度で台風域内の波浪分布を推定できることと考えてよいであろう。

4. 台風域内の波浪分布

(1) 風と波の計算方法

風速および風向の計算にはI-3に述べた方法を用いた。前報告での計算には緯度を30度としたときの風速分布を用いたが、今回はさらに、20度、10度の場合を追加した。任意の点の風速、風向が与えられると、I-2および2.で述べた波の計算理論を用いて、風を受けながら発達しつつ進行する特定の波の要素を逐次算出できる。台風域内の卓越波の波高と周期の分布を求めるため、まず台風域を $r_0/2$ ごとの同心円と10度間隔の動径によって分割し、各領域の中心点を波の出発点として波の発達経路を追跡する。波が1ステップで進行する微小フェッチ ΔF は次式で算定した。

$$\Delta F = \frac{l}{\sqrt{(V/C_g)^2 - 2(V/C_g)\sin\alpha + 1}} \cdot e^{-\frac{r_0}{r}} \quad \dots \dots (5)$$

ここで、 α は波の進行方向の x 軸（台風中心を原点に、台風進行方向と垂直にとる）となす角度で、 l は r_0 の値により、10~30 kmとした。これは、計算式の上で風の条件が変化しない場合は ΔF の大きさは計算の精度にあまり関係ないので、台風とともに進行する相対座標上での移動距離から ΔF を規定したものである。ただし、 ΔF が $C_g \cdot \Delta \tau$ を越えるときは、 $\Delta F = C_g \cdot \Delta \tau$ とし、 $\Delta \tau$ は1時間にとった。

このようにして各小領域内を通過していく波の中でもっとも大きな波高を示す波の要素を拾いあげ、その領域での卓越波としてその分布を求める。

(2) 計算結果

台風域内の最大波高 H_{max} とその周期 T_{max} は、台風の進行速度 $V=0$ に対して図-7、 $V \neq 0$ に対して図-8に与えたように、いずれも台風の規模を表わす定数 ΔP と r_0 が $r_0^{1/4} \cdot \Delta P^{3/4} (=A)$ の形で影響している。また、 A が大きくなるほど、緯度 φ の影響が大きく、低緯度ほど最大波は大きくなる。 H_{max} および T_{max} は

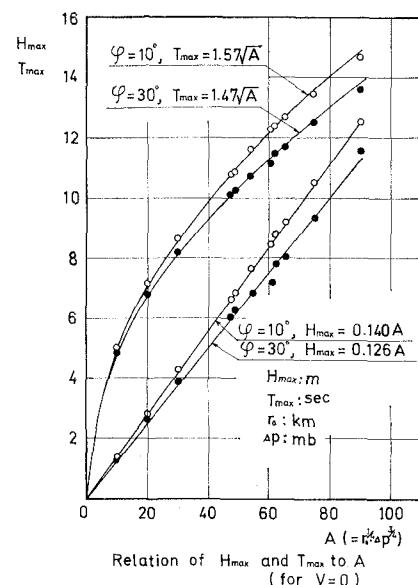


図-7

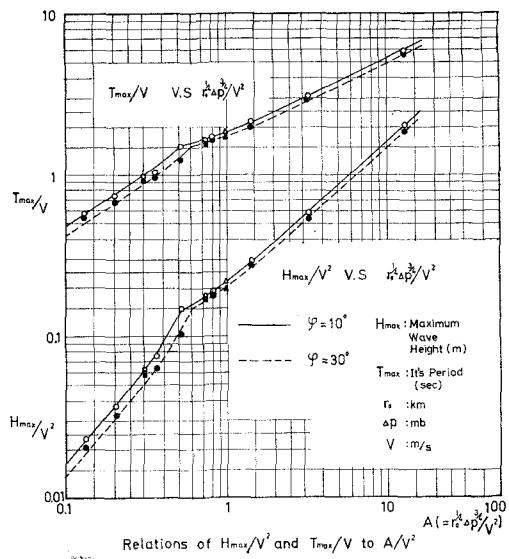


図-8

$V=0$ に対して

$$\left. \begin{aligned} H_{max} &= 0.126 r_0^{1/4} \cdot \Delta P^{3/4} \\ T_{max} &= 1.47 \sqrt{r_0^{1/4} \cdot \Delta P^{3/4}} \end{aligned} \right\} (\varphi = 30^\circ) \quad \dots \dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{max} &= 0.140 r_0^{1/4} \cdot \Delta P^{3/4} \\ T_{max} &= 1.57 \sqrt{r_0^{1/4} \cdot \Delta P^{3/4}} \end{aligned} \right\} (\varphi = 10^\circ) \quad \dots \dots (7)$$

で表わすことができる。

台風域内の波高 H と周期 T の分布は、比波高 H/H_{max} と比周期 T/T_{max} が M に関して特性づけられる。これを図-9~図-13に示す。今回の精度を上げた計算の結果、中心からの距離は、従来の表示よりも H_{max} 、 T_{max} の表示と同様、 $r_0^{1/4} \cdot \Delta P^{3/4}$ を単位にとる

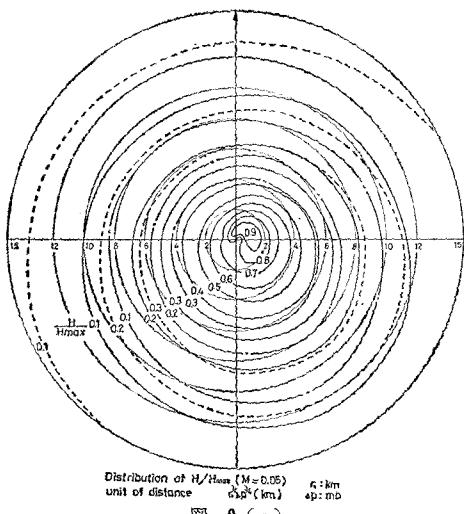


図-9 (a)

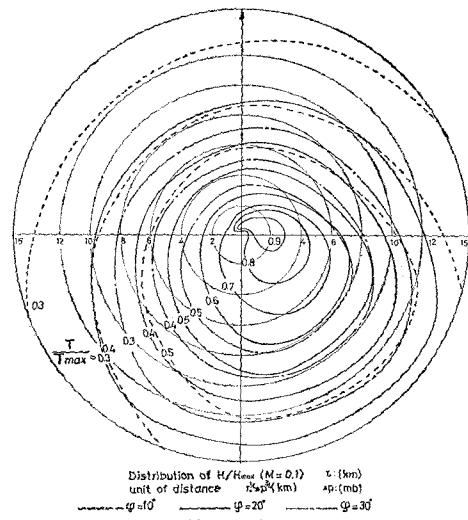


図-10 (b)

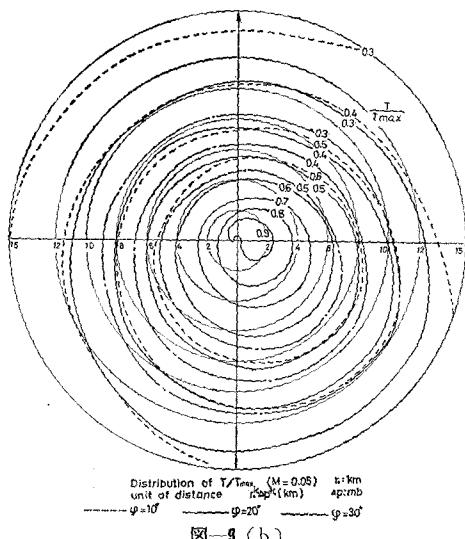


図-9 (b)

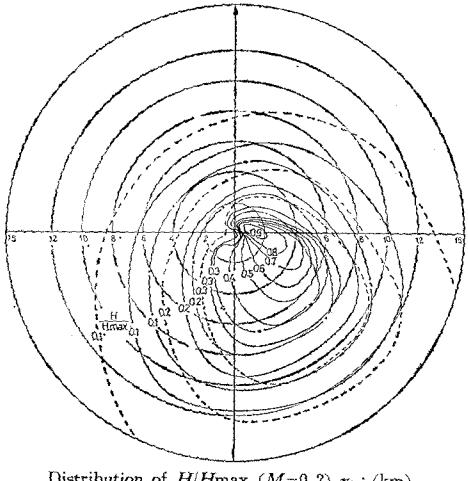


図-11 (a)

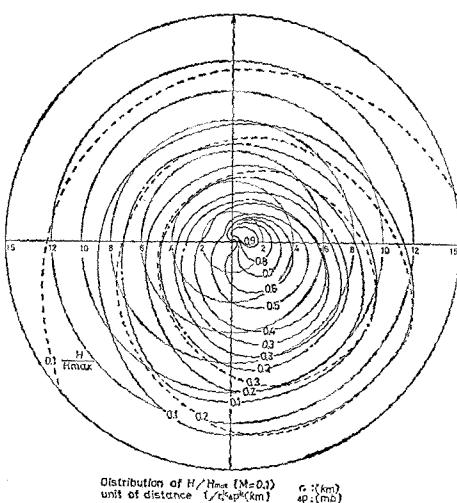


図-10 (a)

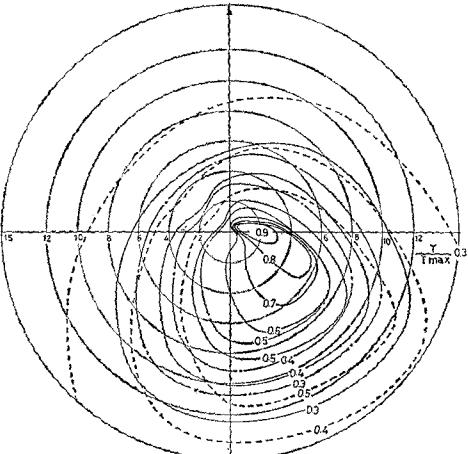
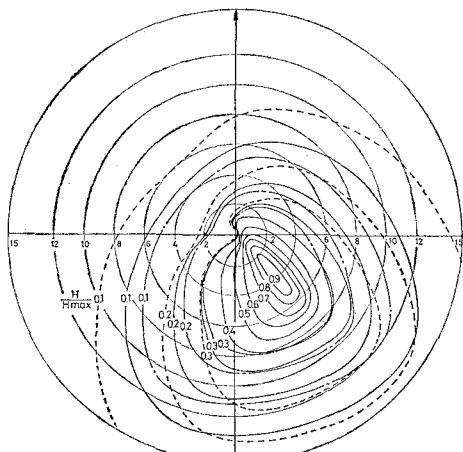
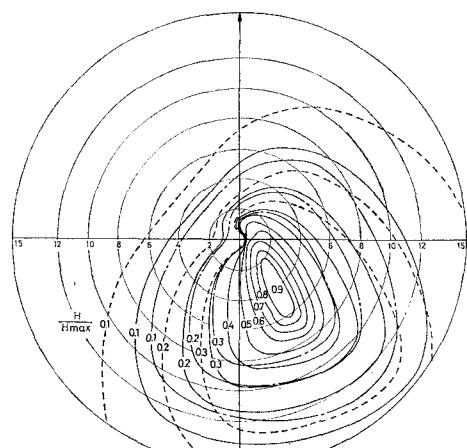


図-11 (b)



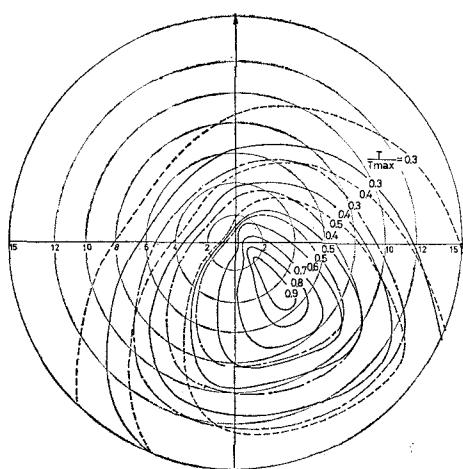
Distribution of H/H_{\max} ($M=0.3$) r_0 : (km)
unit of distance $r_0^{1/4} \Delta p^{3/4}$ (km) Δp : (mb)

図-12 (a)



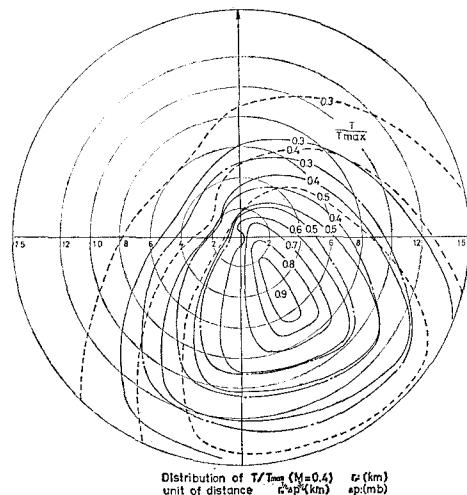
Distribution of H/H_{\max} ($M=0.4$) r_0 : (km)
unit of distance $r_0^{1/4} \Delta p^{3/4}$ (km) Δp : (mb)

図-13 (a)



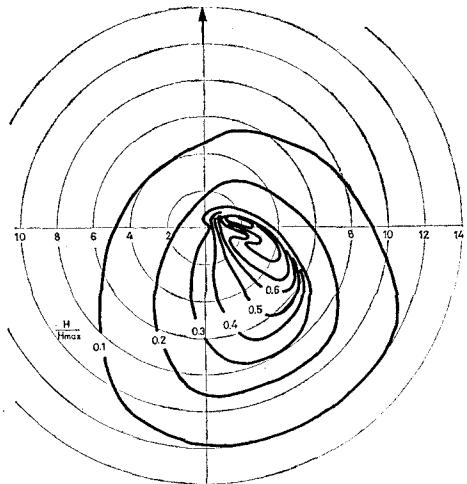
Distribution of T/T_{\max} ($M=0.3$) r_0 : (km)
unit of distance $r_0^{1/4} \Delta p^{3/4}$ (km) Δp : (mb)
----- $\varphi=10^\circ$, —— $\varphi=20^\circ$, -·- $\varphi=30^\circ$,

図-12 (b)



Distribution of T/T_{\max} ($M=0.4$) r_0 : (km)
unit of distance $r_0^{1/4} \Delta p^{3/4}$ (km) Δp : (mb)
----- $\varphi=10^\circ$, —— $\varphi=20^\circ$, -·- $\varphi=30^\circ$

図-13 (b)



Distribution of H/H_{\max} for $M=0.25$, $\varphi=20^\circ$
unit of distance $r_0^{1/4} \Delta p^{3/4}$ (km) Δp : (mb)

図-14

方がより適当であることがわかった。この H/H_{\max} , T/T_{\max} の分布図では実線で緯度 $\varphi=20^\circ$ の場合の分布を示し、周辺部について、破線で $\varphi=10^\circ$ 、一点鎖線で $\varphi=30^\circ$ の分布を示している。これらの図からもわかるように、韓度が低くなるほど周辺部の波は大きくなり、この傾向は M の値が小さいほど顕著にあらわれる。これは、低緯度ほど周辺部の風速分布が大きな値を示すようになるからである。この結果は、多数の台風についての実測値を整理して得られた宇野木博士の波浪分布図とくらべると、分類のパラメーター等が異なるので直接の比較はできないが、ほぼ $\varphi=10^\circ \sim 20^\circ$ の値と一致している。

また、最大波の起こる場所は、 M が 0.2 より小さい時は右前半円の中心近くにあり、 $M \geq 0.3$ の時は右後半

円に移る。図-14は、 $M=0.25$ でこの最大波の起ころが遷移しようとしているときの H/H_{\max} ($\varphi=20^\circ$) の分布図である。この図から遷移が不連続に起こることがわかる。この時の台風の進行速度は、同じ規模の台風について波高が最大になる時であり、図-8の H_{\max}/V^2 , T_{\max}/V の線が折れているところである。

5. あとがき

三陸沖台風の波浪の追算の結果を見ると、この数値計算法における仮定と計算手続きにより、工学的に満足できる波浪分布を与えることができると考えられる。また、一般の台風の波浪分布の追加計算によって、台風域内の波浪分布の特性をさらに明確にすることができ、こ

の計算結果によって台風の波の概略の予知は可能と考えられる。今回の計算によって、台風域の周辺部の波浪の値には緯度の影響が大きく、また、台風の進行速度が急速に加速されている時は最大波の起ころが遷移する場合と最大波の波高等の値が進行速度一定の場合とかなり異なることがわかった。しかし、このような場合についても、この計算法により波の分布はかなり正しく推定できるものと考えられる。

予備計算および付加的計算には運輸省港湾技術研究所副島技官のご協力を得た。この計算には本学大型計算機センターの FACOM-230-60 を主に用い、結果の整理には、大学院生富吉従夫君の助力を得た。ここに感謝の意を表する次第である。