

# 波浪推算に基づくわが国太平洋岸西部での 台風発生最大波高の沿岸分布の推定

## ALONGSHORE DISTRIBUTION OF EXTREMES OF TYPHOON-GENERATED WAVES AROUND THE PACIFIC COAST OF WESTERN JAPAN ON THE BASIS OF WAVE HINDCASTING

山口正隆\*・畑田佳男\*\*・宇都宮好博\*\*\*

By Masataka YAMAGUCHI, Yoshio HATADA and Yoshihiro UTSUNOMIYA

In this paper, an alongshore distribution of extremes of typhoon-generated waves around the Pacific coast of Western Japan is re-evaluated on the basis of a spectral wave prediction model for calculating shallow-water waves at a fixed location. First, the accuracy of the model is examined by comparing the computed and observed significant wave heights during many typhoons in recent years. Second, from wave hindcasting for 101 typhoons which attacked Japanese coasts in the past 50 years, alongshore distribution of maximum significant wave height and wave height for return period of 50 years is estimated and compared with the distribution of design wave height for coastal structures. The effects of the wave prediction model and mesh size used in the computations on maximum wave height are discussed by comparing the present results with the results previously estimated by the authors.

*Keywords* : hindcasting of shallow-water waves, energy balance equation, typhoon-generated waves, extreme of wave height

### 1. 緒 論

わが国の太平洋岸では、台風に伴う激浪が来襲し、しばしば大規模な波浪災害をもたらすので、台風に伴う異常波浪の最大規模とその出現確率を地域別に把握することは、波浪災害対策や海岸・港湾構造物の計画・設計上必須の課題である。しかし、わが国では計測器による組織的な波浪観測が開始されて以来20年程度にすぎず、十分長期間の観測資料が得られていないことから、異常波浪の地域分布の究明は波浪追算に基づいて行う必要がある。

こうした立場から、著者ら<sup>1)</sup>はエネルギー平衡方程式に基づく波浪推算モデルを使用し、過去50年間にわが国太平洋岸の各地に異常波浪をもたらしたと考えられる120個の台風を対象として、台風モデルにより海上風を推定した場合の波浪追算を行った。そして、これらの波浪追算結果から、わが国太平洋沿岸海域や四国沿岸および東海沿岸海域での台風に伴う50年最大有義波高(以

下50年最大波高とよぶ)や50年確率波高を推定し、その海域分布や沿岸分布特性およびこれらと海岸・港湾構造物の設計波高の沿岸分布との対応を考察した。しかし、この研究に用いられた波浪推算モデルは対象領域全体の方向スペクトルの時空間変化を同時に計算する格子点モデルであり、数値計算は計算機の能力の制約により80kmという比較的大きい格子間隔で分割された大領域で行わざるを得なかった。その結果、数値計算ではわが国沿岸に点在する島や複雑な陸地の影響は必然的に無視されることになり、計算結果の空間分解能は十分でなかった。また、細かい陸地の影響を考慮するため、外洋と接続する四国沿岸および東海沿岸の小領域における格子間隔8kmの計算も行われた。しかし、空間分解能が十分でない外洋での波浪の計算結果が沿岸部から100km程度離れた開境界に境界条件として与えられたので、小領域での計算結果はその影響を強く受け、計算結果と観測結果との対応が改良されない場合もあった。さらに、計算格子間隔との関係で波浪追算に深海波浪推算モデルが用いられたので、波浪に及ぼす海底地形の影響は考慮されなかった。

ところで、著者ら<sup>2)</sup>は成分波の発達・減衰・伝播計算を他の成分波と全く独立に進めるDP(decoupled

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科  
(〒790 松山市文京町3番)

\*\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科(同上)

\*\*\* 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科(同上)

propagation) モデルによって定式化したエネルギー平衡方程式を、特定地点に到達する各成分波の波向線上で解くことにより特定地点の方向スペクトルの経時変化を算出する1点浅海波浪推算モデルを提案した。1点モデルは成分波全体に関係する非線形干渉項を含まないので、風波の発達機構に関する現段階での物理像からみるとやや合理性を欠く。しかし、風波の発達項は成分波間の非線形干渉の影響を陰な形で含む観測結果に基づいて定式化されるので、実用上非線形干渉項を含めたモデルと比べて遜色のない推算精度を与える。また、1点モデルでは特定地点に到達する波向線上でのみ波浪の計算が行われるので、特定の数地点を対象とする場合、全格子点での計算を同時に進める格子点モデルに比べてはるかに計算機の占有時間と記憶容量が節約される。したがって、1点法に基づく波浪推算モデルを使用する場合、対象領域を非常に格子間隔の小さい計算格子網に分割することにより、波浪に及ぼす細かい陸地地形や海底地形の影響を考慮することが現在の大型計算機の能力内で十分可能である。

本研究は、前述した著者らの研究<sup>1)</sup>における問題点を解決するため、1点浅海波浪推算モデルを用いた波浪追算に基づいて、関東～九州地方に至るわが国太平洋・東シナ海沿岸での台風に伴う異常波浪の最大規模およびその出現確率を再度推定しようとするものである。すなわち、第1に、近年の多くの台風を対象として、わが国太平洋岸に設置された波浪観測地点で、台風モデルにより海上風を推定した場合の浅海波浪追算を行い、有義波高の経時変化に関する観測結果との比較から、1点浅海波浪推算モデルの精度を検討する。第2に、1934年以降の50年間にわが国沿岸に高波高をもたらしたと推定される101個の台風時について、関東～九州地方沿岸の代表地点における波浪追算を実施し、各台風時の各地点における最大有義波高を算出する。ついで、これらの計算結果から台風に伴う50年最大波高の沿岸分布を求める。また、1950年以降の34年間に於ける年最大波高の経年資料の極値統計解析を行って50年確率波高の沿岸分布をも推定し、これらと海岸・港湾構造物の設計波高および前回の研究<sup>1)</sup>で評価した50年最大波高の沿岸分布との対応を調べる。

## 2. 波浪推算モデルの概要

### (1) 波浪推算モデル

本研究で使用した1点浅海波浪推算モデルの詳細<sup>2)</sup>はすでに発表されているので、ここではその概要を記述するにとどめる。

一般に、海底地形変化を考慮した場合のエネルギー平衡方程式は次式で表わされる<sup>3)</sup>。

$$\frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial t} + C_g \cos \theta \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial x} + C_g \sin \theta \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial y} + \frac{C_g}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial \theta} = CC_g G \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $f$ ：周波数、 $\theta$ ：方向、 $E(f, \theta)$ ：方向スペクトル、 $C$ ：波速、 $C_g$ ：群速度および  $G$ ：source function、である。式(1)において左辺第1項は方向スペクトルの非定常変化、第2項および第3項は移流伝播、第4項は屈折・shoalingを、一方、右辺はエネルギーの流入を表わす。したがって、式(1)は屈折および shoaling の効果を包含しているが、回折の効果を全く含まない。

さて、本 DP モデルでは成分波間の非線形干渉項が考慮できないので、式(1)の source function は風からのエネルギー流入項とエネルギー減衰項のみから構成される。そしてこれは順風状態 ( $|\phi| \leq \pi/2$ ) の風波 ( $E(f, \theta) \leq E_\infty(f, \theta; h)$ ) およびうねり ( $E(f, \theta) > E_\infty(f, \theta; h)$ ) と逆風状態 ( $|\phi| > \pi/2$ ) のうねりに対し、それぞれ次式のように表わされる。

$$G = \begin{cases} \alpha + (\beta - D_f) E(f, \theta) & ; |\phi| \leq \pi/2, E(f, \theta) \leq E_\infty(f, \theta; h) \\ -D_a \{ E(f, \theta) - E_\infty(f, \theta; h) \} - D_f E(f, \theta) & ; |\phi| \leq \pi/2, E(f, \theta) > E_\infty(f, \theta; h) \\ -(D_w + D_f) E(f, \theta); |\phi| > \pi/2 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\alpha$ ：Phillips 機構による風波の発生項で井上の表示式に対する Cardone の修正式<sup>3)</sup>、 $\beta E(f, \theta)$ ：Miles 機構による風波の発達項で郭<sup>4)</sup>の経験式に対する修正式<sup>2)</sup>、 $D_f E(f, \theta)$ ：底面摩擦によるエネルギー減衰項で Janssen ら<sup>5)</sup>の線形近似式、 $D_a E(f, \theta)$ ：一種の擬似粘性によるエネルギー減衰項<sup>2)</sup>、 $D_w E(f, \theta)$ ：逆風によるエネルギー減衰項、 $E_\infty(f, \theta; h)$ ：Pierson-Moskowitz スペクトルおよび Thornton<sup>6)</sup>の浅海平衡スペクトルを組み合わせた周波数スペクトルと  $\cos^4 \theta$  型方向分布関数との積で与えられる平衡方向スペクトル、 $\phi = \theta - \theta_w$ 、 $\theta_w$ ：風向、である。一方、砕波によるエネルギー減衰は、風波の発達段階で式(2)の第1式による方向スペクトルの計算結果が平衡方向スペクトルを越える場合に、 $E(f, \theta) = E_\infty(f, \theta; h)$  とすることにより評価される。また、前回のモデル<sup>2)</sup>では Miles 機構が逆向きに作用すると仮定して逆風に伴うエネルギー減衰項を表示したが、本モデルでは逆風減衰に関する吉田・光易<sup>7)</sup>の実験式を修正した、

$$D_w = 0.25 (u_* / C)^2 \exp \{-2.634 \times 10^{-4} (C / u_*)^2 \} f \times |\cos \phi| \dots\dots\dots (3)$$

を使用する。ここに、 $u_*$  は摩擦速度であり、Mitsuyasu<sup>ら</sup>による海面での抵抗係数に対する経験式を用いて 10 m 高度での風速  $U_{10}$  から求められる。なお、低周波側での過大なエネルギー減衰を避けるため、式(3)には指数関数部が新たに付加されている。

(2) 数値計算法

本モデルの数値計算は式(1)の右辺を0とした移流伝播方程式と移流伝播項を無視した発達・減衰方程式を1タイムステップ内で交互に解いて解を求める時間分割法による。

まず、移流伝播方程式は、

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= C_g \cos \theta, \quad dy/dt = C_g \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{C_g}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

であり、これは各成分波ごとに与えられる波向線上で、 $CC_g E(f, \theta) = \text{const}$  が成立することを意味する。波浪推算点に到達する成分波の波向線の経路および波向は、波浪推算点の位置とそこでの波特性を初期値とした Runge-Kutta 法に基づく式(4)の数値積分(逆屈折計算)から求められる。また、1タイムステップ内の移流伝播計算は波向線上の各計算点における  $CC_g E(f, \theta)$  を波浪推算点方向に1計算点移動させることにより完了する。なお、波向線計算におけるタイムステップは通常  $\Delta t = 10 \text{ min}$  であるが、波浪計算は計算時間を節約するため、波向線の位置データから6個とばしに選ばれた計算点でタイムステップ  $\Delta t = 1 \text{ h}$  として行われる。したがって、群速度が小さい浅海部ほど計算点間の距離は短くなる。

次に、発達・減衰計算は波向線上の各計算点における移流伝播計算結果を初期値として発達・減衰方程式の解析解から  $\Delta t$  後の解を算出することにより行われる。特に、風波の発達段階で方向スペクトルの計算結果が平衡方向スペクトルを越える場合には前述のように  $E(f, \theta) = E_0(f, \theta; h)$  とする。上述した移流伝播計算と発達・減衰計算を交互に全対象期間、全周波数および全方向について繰り返せば、波浪推算点での方向スペクトルの経時変化が算出される。さらにこれを方向および周波数について数値積分することにより、周波数スペクトルおよび平均波の経時変化が求められる。

3. 波浪推算モデルの精度

(1) 計算方法

計算領域は北緯  $16^\circ \sim 44^\circ$ 、東経  $122^\circ \sim 150^\circ$  (南北 3 360 km, 東西 3 360 km) の太平洋上に設けられており、浅海域を含めた波浪推算を行うために 5 km の格子間隔が用いられた。水深は陸地部および島の周辺では 5 km ごとに、それ以外では 20 km ごとに海図より読み取ら

れ、線形内挿を通じて最終的に 5 km 格子網上で与えられた。Fig. 1 は計算領域と志布志および石廊崎での  $f = 0.05 \text{ Hz}$  に対する波向線を示したものである。これによると、波向線が対象地点から  $5^\circ$  おきに放射しているのに対し、対象地点および島近傍の浅海部における屈折によって領域端では波向線間の角度が増加している。

さて、波浪推算に必要な海上風の推定は台風内の気圧分布として Meyer 式を用いた台風モデル<sup>9)</sup>によることとし、3~6 時間間隔で与えた台風半径、気圧深度、吹き込み角および台風位置から、30 分間隔でこれらのデータを内挿したのち、格子間隔 80 km の格子網上で 30 分ごとの風特性を計算した。吹き込み角は緯度  $10^\circ$  ごとに与えられた値<sup>9)</sup>を台風中心の位置に応じて線形内挿し、傾度風から海上風への変換係数は 0.6 とした。また、台風接近時における波浪推算点近傍の波浪計算点で、海上風が空間内挿に伴って平滑化される影響を小さくするため、波浪推算点を中心とする 400 km 四方の海域での海上風を格子間隔 10 km の格子網上で 30 分ごとに算出した。そして、波浪推算点では前述の台風モデルにより海上風を 30 分ごとに直接計算するとともに、波向線上の各計算点では波浪推算点との距離に応じて 10 km 格子網あるいは 80 km 格子網で与えられた海上風から二次元 1 次補間式の適用により空間内挿した。

次に、計算に用いた周波数は  $f = 0.035 \sim 0.5 \text{ Hz}$  の 23 個、方向分割数は 30 個であり、方向幅は波浪の到達範囲を考慮して各地点ごとに与えた。したがって、方向間隔は波浪推算点ごとに異なるが、 $3 \sim 12^\circ$  の範囲にある。また、境界条件として、波向線の最終到達地点のうち外洋の境界では、局所風特性に対応して Ross の台風モデ

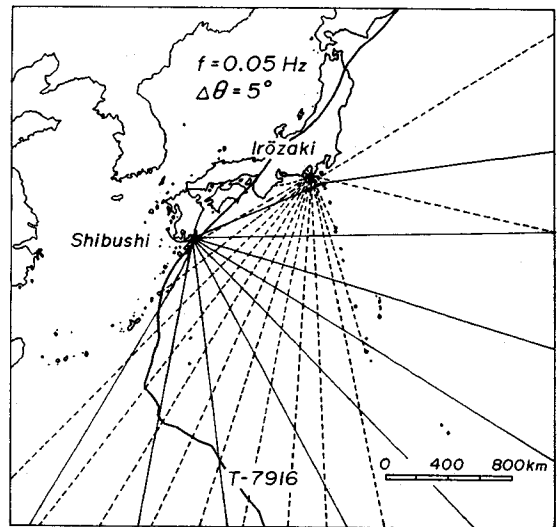


Fig.1 Computational area, typhoon track and examples of refraction diagram.

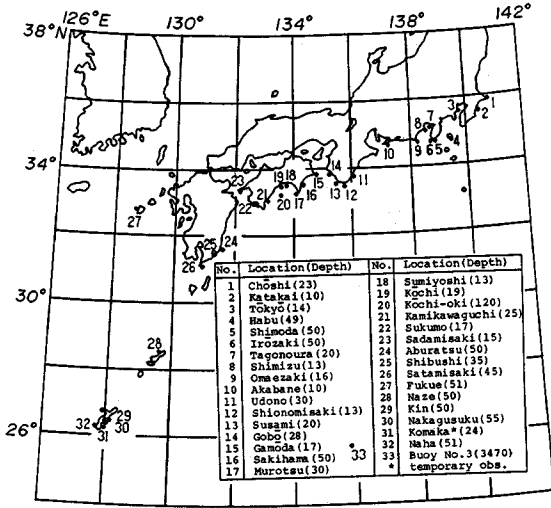


Fig.2 Locations of wave gauges deployed around the Japanese coast and the respective water depths.

ルによる周波数スペクトル<sup>10)</sup>と  $\cos^4 \theta$  型方向分布関数の積から計算される方向スペクトルを与えるとともに、陸地境界では方向スペクトルを0とした。一方、初期条件として波向線上の全計算点で方向スペクトルが0という条件を用いた。

実際の計算は、波浪追算点ごとに台風が南方洋上で発生した時点から日本列島を北上あるいは縦断して消滅した時点に至る台風のほぼ全期間に対して実施された。

Fig. 2は波浪推算モデルの精度の検討に用いられた追算対象地点（波高計設置点）の位置および水深を示したものであり、東は銚子から西は那覇、南はパイ No. 3に及ぶ。

(2) 計算結果と観測結果の比較

波浪推算モデルの精度を検討するために計算対象とした台風は台風7916号～8310号の13台風であるが、紙数の関係上、7916号の場合に限定して有義波高の経時変化に関する比較結果を述べる。1979年9月23日ヤップ島の北で発生した台風7916号は26日には沖縄本島南海上をゆっくりと北上したのち、29日午後進路を北東に変えるとともに、30日室戸岬を通過、和歌山市付近に再上陸して日本列島を縦断した。

Fig. 3は紀伊半島～沖縄本島に至る沿岸部で観測された有義波高の観測結果（白丸）と計算結果（実線）を示したものである。観測結果はすべての地点で台風の全期間について取得されているわけではないが、全般的にみて計算は観測された経時変化特性をかなりの精度で評価している。また、個々の観測点は台風経路からそれほど離れていないにもかかわらず、波高は観測点周辺の陸地地形の影響を受けて場所によりかなり異なる傾向がよく

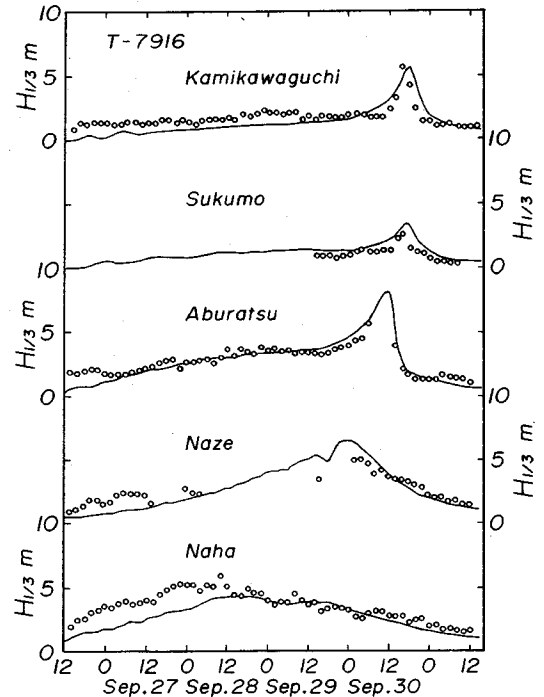
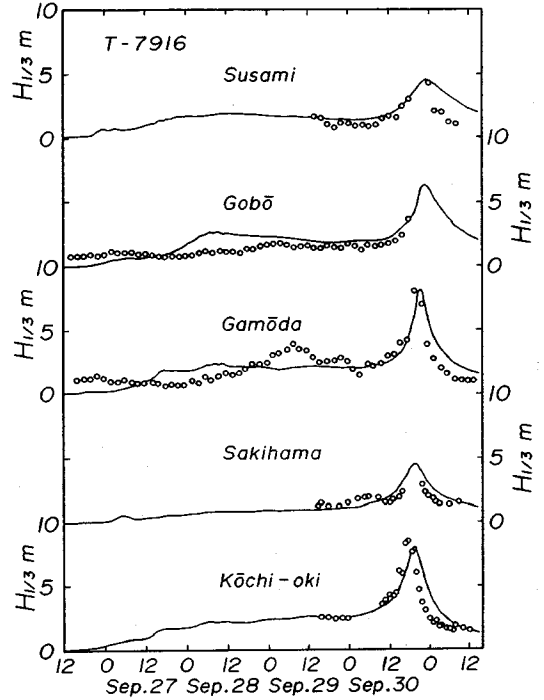


Fig.3 Comparison between computed and observed significant wave heights.

再現されている。しかし、周参見におけるように、計算が台風通過後に現われる観測波高の急減を再現しないことや高知沖におけるように、両者の経時変化に若干ずれ

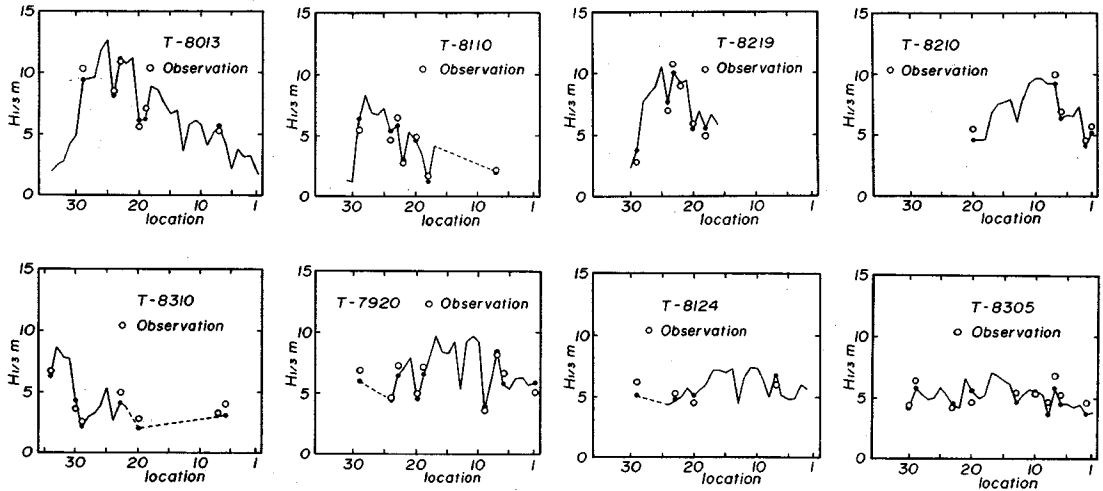


Fig. 4 Comparison between computed and observed results for alongshore distribution of maximum significant wave height during a typhoon.

があること、さらに、おそらく台風モデルで考慮されない気象じょう乱の影響や計算対象期間の不足により、那覇での発達期前半において両者の対応が十分でないなどの相違点も存在する。

本研究の主眼は台風に伴う有義波高の経時変化そのものよりむしろ個々の台風時におけるそれぞれの地点での最大有義波高の推定にあるので、次にこれに対する本モデルの精度を検討する。Fig. 4 は近年の 8 個の台風時における最大有義波高の沿岸分布について観測結果と計算結果を比較したものである。この沿岸分布は後述する陸地から 10 km 沖合の地点での計算結果（実線）のうち、波浪観測点が近くに存在する場合には、これを波浪観測点での計算結果（黒丸印）と置き換えることにより得られており、横軸の番号（地点位置）も後出の Fig. 6 に従う。これらの波高分布は、台風経路に沿って四国沖など

計算領域の西部から東部に向かうにつれて波高が減少する場合（8013 号、8110 号、8219 号）、東部で波高が大きい場合（8210 号）、西部で波高が大きい場合（8310 号）および領域全体で波高がそれほど変わらない場合（7920 号、8124 号、8305 号）に分類されるが、いずれの場合にも計算は観測結果の変化傾向をかなりよく再現する。

Fig. 5 は各台風時の個々の地点における最大有義波高の観測結果と計算結果の対応を示したものである。これによると、ほとんどのケースにおいて両者の相違は±20%以内であり、特に高波高時には多くの場合±10%以内になまる。また、データ点は観測結果と計算結果が等しいことを示す  $H_{1/3cal} = H_{1/3obs}$  の直線のまわりにほぼ対称に分布しており、特定の偏りを示さない。

以上のことから、台風モデルにより海上風を推定した場合の本研究の波浪推算モデルは台風通過後の減衰期における波高の再現性に若干の問題を有するが、少なくとも最大有義波高の推定に対しては十分な実用性をもつと判断される。

#### 4. 台風に伴う 50 年最大波高および 50 年確率波高の沿岸分布

##### (1) 計算対象台風および波浪推算地点

以前に著者ら<sup>1)</sup>はわが国太平洋岸での台風に伴う 50 年最大波高や 50 年確率波高の沿岸分布を推定するために、台風に関する気象資料や波浪観測および波浪推算に関する資料の詳細な調査から、1934 年～1983 年にわが国の太平洋岸に強い影響を及ぼしたと推定される 120 個の台風を抽出し、格子間隔 80 km の計算格子網上で格子点モデルに基づき、これらの台風を対象とした波浪推算を実施した。この結果を参照すれば、相対的に小さい

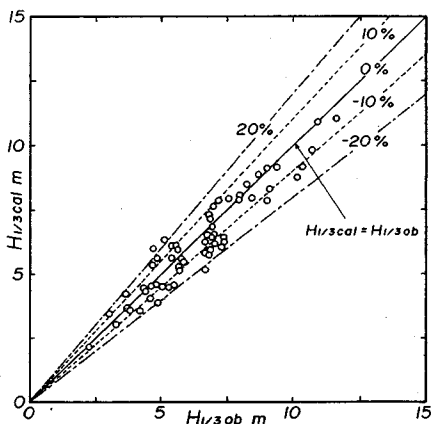


Fig. 5 Comparison between computed and observed maximum significant wave heights during a typhoon.

Table 1 Name of typhoons used in wave hindcasting.

| No. | typhoon | No. | typhoon | No. | typhoon | No. | typhoon | No. | typhoon | No. | typhoon |
|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 1   | 3412    | 18  | 5405    | 35  | 6011    | 52  | 6615    | 69  | 7209    | 86  | 7818    |
| 2   | 4216    | 19  | 5412    | 36  | 6015    | 53  | 6624    | 70  | 7220    | 87  | 7911    |
| 3   | 4222    | 20  | 5414    | 37  | 6016    | 54  | 6626    | 71  | 7306    | 88  | 7916    |
| 4   | 4326    | 21  | 5415    | 38  | 6118    | 55  | 6718    | 72  | 7310    | 89  | 7920    |
| 5   | 4327    | 22  | 5522    | 39  | 6123    | 56  | 6734    | 73  | 7408    | 90  | 8013    |
| 6   | 4420    | 23  | 5526    | 40  | 6124    | 57  | 6804    | 74  | 7414    | 91  | 8019    |
| 7   | 4516    | 24  | 5612    | 41  | 6207    | 58  | 6810    | 75  | 7416    | 92  | 8110    |
| 8   | 4821    | 25  | 5615    | 42  | 6213    | 59  | 6816    | 76  | 7505    | 93  | 8115    |
| 9   | 5008    | 26  | 5707    | 43  | 6214    | 60  | 6909    | 77  | 7506    | 94  | 8118    |
| 10  | 5028    | 27  | 5710    | 44  | 6304    | 61  | 7002    | 78  | 7513    | 95  | 8124    |
| 11  | 5029    | 28  | 5817    | 45  | 6309    | 62  | 7009    | 79  | 7609    | 96  | 8210    |
| 12  | 5111    | 29  | 5821    | 46  | 6311    | 63  | 7010    | 80  | 7611    | 97  | 8213    |
| 13  | 5115    | 30  | 5822    | 47  | 6411    | 64  | 7011    | 81  | 7617    | 98  | 8218    |
| 14  | 5202    | 31  | 5906    | 48  | 6420    | 65  | 7119    | 82  | 7707    | 99  | 8219    |
| 15  | 5209    | 32  | 5907    | 49  | 6515    | 66  | 7123    | 83  | 7709    | 100 | 8305    |
| 16  | 5302    | 33  | 5914    | 50  | 6523    | 67  | 7125    | 84  | 7711    | 101 | 8310    |
| 17  | 5313    | 34  | 5915    | 51  | 6524    | 68  | 7207    | 85  | 7808    |     |         |

波しか発生しなかった台風は省かれるので、わが国太平洋岸の各地点に年最大波高を発生させた台風を効率よく選択することができる。検討の結果抽出された台風は、Table 1 に示すように 1934 年～1983 年の間の 101 台風であり、このうち、1934 年～1949 年の 8 台風は 50 年最大波高の沿岸分布を、また 1950 年～1983 年の 93 台風は 50 年最大波高および 50 年確率波高の沿岸分布を推定するために使用される。この場合、50 年確率波高は年最大波高資料に関する極値統計解析から算出されるので、計算対象地点ごとに毎年 1～4 個の台風が選択されている。

次に、50 年最大波高や 50 年確率波高の沿岸分布を推定するための波浪追算対象地点は、関東地方（銚子）から九州地方西北部（伊王島）に至る 34 地点であり、いずれの場合も陸地部より 10 km 沖合の格子点選ばれた。関東以北の地域を追算対象地点としなかったのは、ここでは台風による波浪が必ずしも支配的でないためであり、また 10 km 沖合に波浪追算点を選んだのは局所的な地形の影響が追算結果に過度に含まれることを避けるためである。Fig. 6 はこれらの地点の位置および水深を一括して示している。

(2) 台風別最大波高の沿岸分布

波浪追算は、Table 1 の 101 台風に対し前述の台風の諸特性、初期条件および境界条件のもとに 34 地点で実施され、台風別最大有義波高の沿岸分布が求められたが、ここでは Fig. 7 に経路を示すようにわが国に来襲した代表的台風である 4516 号（枕崎台風）、5313 号（テス台風）、5612 号（エンマ台風）、5907 号（ジョージア台風）、5915 号（伊勢湾台風）および 6118 号（第 2 室戸台風）の合計 6 台風を検討の対象とする。もちろんこれら以外の台風によっても高波浪はもたらされているが、対象領域の一部または大部分に最大級の波浪を発生した台風が

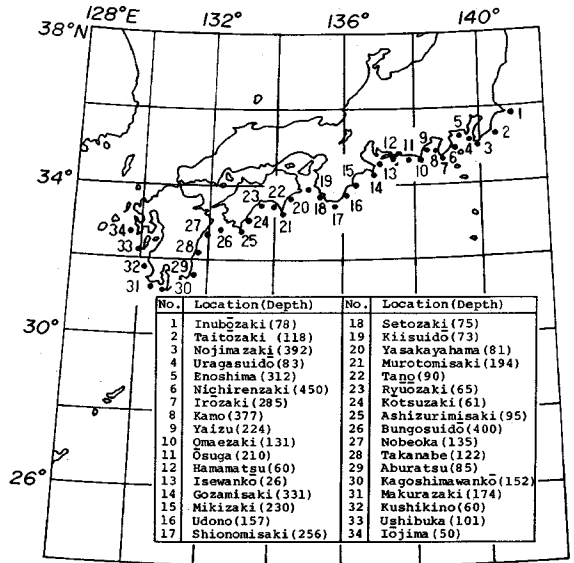


Fig. 6 Locations selected for hindcasting extreme of significant wave height and the respective water depths.

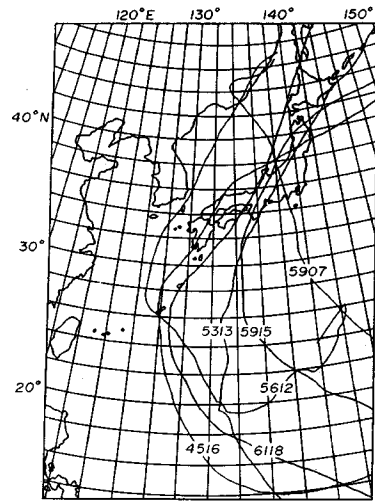


Fig. 7 Tracks of intense typhoons used in wave hindcasting.

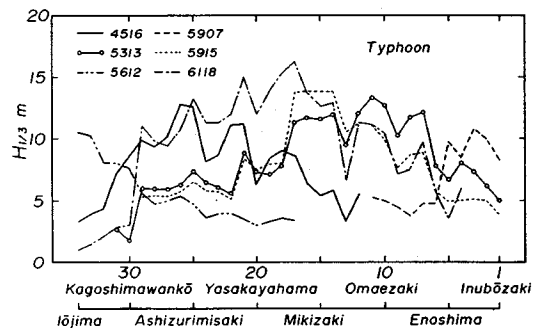


Fig. 8 Alongshore distribution of maximum significant wave height during an intense typhoon.

その経路を考慮して選択されている。Fig. 8は、Fig. 6に示す陸地部より10 km 沖合の34地点における台風別最大波高分布を一括して示したものである。この図によると、波高の最大域は台風の経路により大きく異なり、たとえば5612号時では九州西北部に、5907号時では房総半島沿岸に最大域が生ずる。また、4516号および5915号時の高波高域は相対的に狭いのに対し、5313号および6118号時の高波高域は広いという台風特性による相違も存在する。さらに、対象領域全体では15 mを越える波高の最大値は6118号時に潮岬付近で発生している。

(3) 50年最大波高の沿岸分布

最大101個の台風時の最大有義波高資料からその最大値を各地点ごとに抽出し、これを1934年～1983年の50年間における最大有義波高(50年最大波高)とみなす。

Fig. 9は関東～九州地方における50年最大波高の沿岸分布、10 m以上の最大有義波高を発生した台風個数の沿岸分布および運輸省による昭和45年～昭和59年間の台風に伴う最大有義波高の観測結果<sup>11)</sup>を示したものである。これによると、九州西南端や相模湾を除いた対象領域のほぼ全域で50年最大波高は10 mを越えるが、なかでも豊後水道から石廊崎に至る広い沿岸部では12 m以上、特に室戸岬～潮岬間では14 m以上の巨大な波浪が発生している。しかし、相模湾、伊勢湾口、八坂八浜、高知湾内や薩摩半島では周辺の陸地や島の遮蔽効果のため、波高が局所的に小さい。また、10 m以上の高波高の発生回数は室戸岬、足摺岬、潮岬、御前崎および石廊崎など直接外洋に面する地点で多く、波高も相対的に大きい。反面、日向海岸、高知湾内、紀伊水道内四国沿岸および駿河湾西側など北東方向に進行する台風に伴って生ずる南西方向からの波浪が陸地で遮蔽される沿岸部や勢力の強い台風があまり通過しない房総半島沿岸では、高波高の発生回数は上述の地点に比べて相対的に少なく、波高も小さい。さらに、前述のように相模湾内

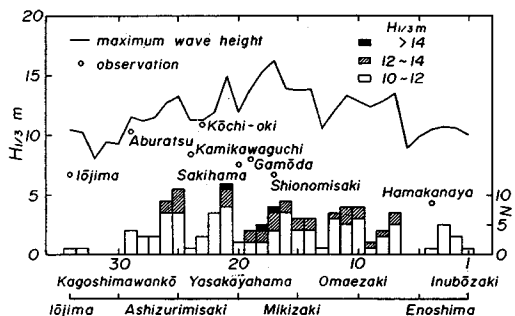


Fig. 9 Alongshore distribution of maximum significant wave height in the past 50 years and frequency of occurrence of waves with more than 10 m height.

や薩摩半島では伊豆諸島や伊豆半島ならびに奄美大島や屋久島、種子島の遮蔽効果により10 mを越える波高は生じていない。一方、観測結果との関係を見ると、油津および高知沖では台風8013号により50年最大波高に迫る波高が観測されているが、他の地点では測得期間、測得率および波高計設置水深の制約や波浪追算位置と波高計設置位置との相違などのため、観測波高は追算結果よりかなり小さい。

Fig. 10は各年1～4個の台風に対する波浪追算から求められた関東～九州地方沿岸における地点別台風発生年最大波高の経年変化の数列を示したものである。これらの図によると、浦賀水道では房総半島や伊豆半島および伊豆諸島による遮蔽効果のため、直接外洋に面する石廊崎に比べて年最大波高はかなり小さく、10 mを越えることはないが、時系列の形は非常によく似ている。これは、石廊崎と浦賀水道の距離が100 km程度とそれほど大きくないことから、大部分の年最大波高が同じ台風によってもたらされることを示唆している。しかし、約150 km離れた潮岬と土佐湾内の竜王崎での年最大波高の経年変化特性は相互に異なっており、特に超大型台風がしばしば来襲した1950年代から1960年代前半にかけて潮岬での年最大波高が大きい年が多い。これは両地点の年最大波高が異なる台風によりもたらされた年が多いためである。すなわち、潮岬では四国～紀伊半島沖を北東あるいは北に進行する台風により年最大波高がもたらされる傾向があり、しかもここでは室戸岬や九州の遮蔽効果が有効に働かないためにその絶対値も大きくなる。

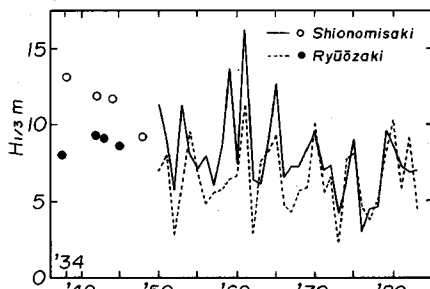
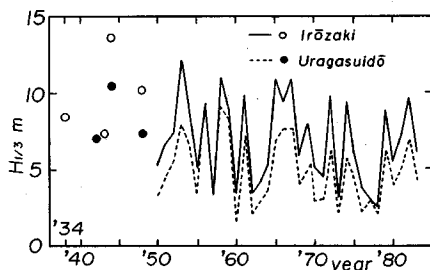


Fig. 10 Long-term variation of annual maximum significant wave height at selected locations.

その結果、たとえば6118号時には最大波高は15mを越える。一方、竜王崎では大型台風の典型的な経路である北東方向に進路を取る台風に伴う波浪は足摺岬や九州南部で遮蔽され、さらに潮岬に異常な高波高をもたらす台風時には竜王崎はその最盛期に逆風領域に入ることもある。したがって、一般に竜王崎での年最大波高は潮岬でのそれより小さく、それぞれの地点に年最大波高をもたらす台風も異なることになる。

(4) 50年確率波高の沿岸分布

1950年から1983年までの年最大波高の経年資料に対する極値統計解析を行い、50年確率波高の沿岸分布を推定する。解析に使用した理論確率分布は水文統計や波浪統計においてひんぱんに用いられてきた対数正規分布、Weibull分布およびGumbel分布であり、特に、ここでは大部分の地点で資料との適合度が最も良好であると視察から判断された3母数対数正規分布<sup>12)</sup>をあてはめた結果を述べる。極値統計解析にあたり、理論的立場からはGumbel分布の使用が望ましいが、資料との高適合性を得るという現実的要請から3母数をもつ対数正規分布やWeibull分布が適用された。

Fig. 11は浦賀水道、潮岬および竜王崎における年最大波高の経年資料をThomasプロットで対数正規確率紙に図示し、3母数対数正規分布と比較したものであり、資料との適合度から判断して、この場合積率法により推定された母数が用いられている。この結果によると、潮岬におけるように高波高部で理論分布と資料との間に若干の偏りが見出される場合も存在するけれども、対数正規分布は大部分の地点で年最大波高資料に対し高い適合度を与えており、浦賀水道、潮岬および竜王崎での50年最大波高(9.2m, 16.2mおよび11.3m)の再現期間はそれぞれ35年, 96年および45年である。

Fig. 12は3母数対数正規分布を仮定した場合の50年確率波高、50年最大波高および海岸・港湾構造物の設計波高<sup>1)</sup>の沿岸分布を一括して示したものである。この図によると、50年確率波高は九州沿岸では10~12m、四国沿岸では12~14m、紀伊半島では13~15m、伊勢湾~伊豆半島西側では10~13mおよび伊豆半島以東で

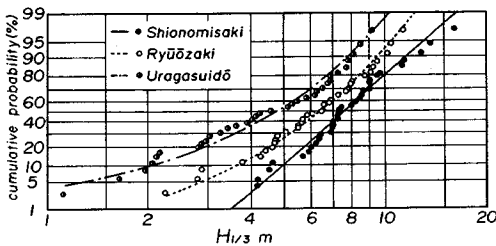


Fig. 11 Cumulative probability of annual maximum significant wave height at selected locations.

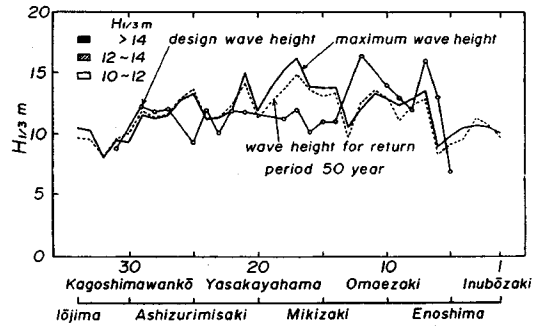


Fig. 12 Alongshore distribution of maximum significant wave height in the past 50 years, wave height for return period of 50 years and design wave height for coastal structures.

は10m程度であり、大型台風がしばしば通過した室戸岬~紀伊半島での波高が相対的に大きい。また、50年最大波高と比べると、両者はおおむねよく対応するが、紀伊半島での50年最大波高は50年確率波高を1m強上まわる地点が多いことから、紀伊半島では異常に大きい波高が発生する可能性が高いといえる。さらに、50年確率波高や50年最大波高と設計波高との対応は九州・四国西部沿岸では良好である。しかし、室戸岬から紀伊半島では設計波高が前2者より小さく、逆に遠州灘から伊豆半島では前2者より大きい地点が多い。

(5) 50年最大波高に及ぼす波浪推算手法の影響

Fig. 13は50年最大波高の沿岸分布に及ぼす波浪推算モデルの種類(source functionの表現法、数値計算手法および深海波モデル、浅海波モデル)と格子間隔の影響を調べたものであり、図中の各線と計算手法の対応は次のとおりである。

(1) 点線：格子間隔80kmの太平洋大領域で深海波推算モデル(格子点モデル)により120個の台風に対する波浪追算から推定した結果<sup>1)</sup>,

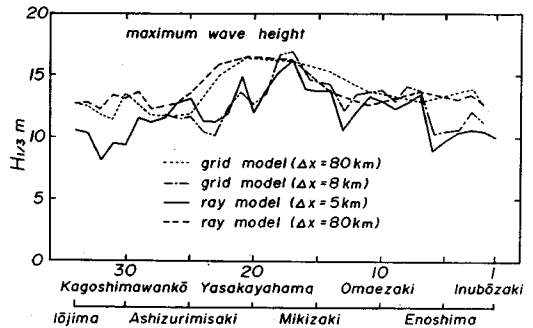


Fig. 13 Effects of wave prediction model and mesh size used in wave hindcasting on alongshore distribution of maximum significant wave height in the past 50 years.



(ii) 1点鎖線:(i)の120個の台風のうち、四国～東海地方沿岸に最大級の波高をもたらした合計6個の台風に対し、格子間隔8kmの四国沿岸および東海地方沿岸小領域に(i)の大領域での計算結果を境界条件として与えて深海波浪推算モデル(格子点法)による波浪追算から推定した結果<sup>1)</sup>、

(iii) 実線:格子間隔5kmの太平洋大領域で、1点浅海波浪推算モデルによる101個の台風に対する波浪追算から推定した本研究の結果、

(iv) 破線:(i)で使用した120個の台風のうち、わが国太平洋岸の各格子点に50年最大波高をもたらした台風を対象として各格子点ごとに(i)と同じ格子間隔80kmの太平洋大領域で1点深海波浪推算モデルによる波浪追算を実施して推定した結果、である。

さて、(i)と(iv)の結果を比較すると、両者はよく対応しているが、紀伊半島東部あるいは四国西部のように1.5m程度の差が生じている地点もある。これは主として波浪推算モデルにおけるsource functionの表現法およびその数値計算手法の相違に起因するものであり、用いる波浪推算モデルによって、50年最大波高の追算結果には最大1.5m程度の差が生じ得ることを意味する。こうした傾向は5～8kmの格子間隔を使用した(ii)および(iii)の間にも存在するが、同一地点に最大波高をもたらした台風が(ii)と(iii)の場合で異なり得ること、両者の空間分解能(8kmと5km)が異なることおよび(iii)には水深変化の影響が考慮されていることに注意する必要がある。また、(i)と(ii)あるいは(iii)と(iv)を比較すれば、小さい格子間隔を使用した計算結果((ii)と(iii))には岬や半島および島などの局所的な地形の影響が強く現われるため、全般的に、50年最大波高の絶対値がより小さくなり、しかも沿岸方向変動も著しいことがうかがわれる。もちろん、(iii)と(iv)の相違には陸地地形に対する空間分解能のみならず水深の影響も寄与する。

以上のように、50年最大波高の沿岸分布は陸地地形に対する空間分解能に強く依存する場合もあるが、最大1.5m程度の差を許容するならば、用いる波浪推算モデルにはそれほど影響されなといえよう。

## 5. 結 論

本研究では、まず計算機の占有時間の節約と詳細な陸地地形や海底地形の再現が可能である1点浅海波浪推算モデルの台風発生波浪に対する追算精度を明らかにした。ついで、過去50年間の多くの台風に対する波浪追算から、関東～九州地方における50年最大波高ならびに50年確率波高の沿岸分布を推定し、その特性を海岸・

港湾構造物の設計波高との対応をも含めて調べた。

得られた結果は次のように要約される。

(1) 1点波浪推算モデルによれば、格子間隔5kmで分割した約3400km×3400kmの広大な海域での波浪追算が可能であり、その結果、計算対象領域内に点在する小群島や細かい陸地地形による波浪の遮蔽効果および海底地形変化による波浪の屈折変形を計算において考慮することができる。

(2) 1点浅海波浪推算モデルは、台風モデルにより海上風を推定した場合でも台風時の波浪観測結果の経時変化特性を比較的よく再現する。また、1つの台風における個々の地点での最大有義波高に対する追算誤差は平均的には±20%以内、高波高時には±10%以内であり、特定の偏りを示さない。

(3) 関東～九州地方沿岸における50年最大波高は相模湾などごく一部を除き10mを越えるが、なかでも豊後水道から石廊崎に至る広い沿岸部で12m以上、特に室戸岬～潮岬間では14m以上となる。また、直接外洋に面する地点での高波高の発生回数も多く、波高も相対的に大きい。

(4) 3母数対数正規分布を用いた年最大波高資料の極値統計解析によれば、50年確率波高の沿岸分布は50年最大波高のそれとよく符合する。

(5) 50年最大波高や50年確率波高と設計波高とを比べると、室戸岬から紀伊半島では後者が小さいのに対し、遠州灘から伊豆半島では後者が大きい地点が多い。

(6) この種のモデルを用いれば、計算手法や基本式の細部によらずほぼ同様な50年最大波高の推定結果が得られる。しかし、これが陸地地形に対する空間分解能(計算格子間隔)に強く依存する場合もある。

最後に、貴重な風および波資料を提供いただいた運輸省港湾建設局を始めとする関係各官庁に深甚の謝意を表明するとともに、資料の整理や図面の作成に助力いただいた愛媛大学工学部海洋工学科 大福 学技官に感謝する次第である。また、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(2)(代表:山口正隆)による研究成果の一部であることおよび本研究の数値計算は九州大学大型計算機センターのFACOM M-382と愛媛大学情報処理センターのFACOM M-180 II ADによって行われたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 山口正隆・畑田佳男・小淵恵一郎・日野幹雄:波浪推算に基づくわが国太平洋岸での台風発生最大波高の地域分布の推定, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp.131～140, 1987.
- 2) 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博:1地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第

- 381号/II-7, pp.151~160, 1987.
- 3) Young, I. R. and Sobey, R. J. : The numerical prediction of tropical cyclone wind-waves, Dept. of Civil and Systems Eng., Res. Bull. No. CS 20, James Cook Univ., p.50, 1981.
  - 4) 郭 金棟：浅海における風波の一次元スペクトルの推算法, 第20回海岸工学講演会論文集, pp.447~452, 1973.
  - 5) Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J. and De Voogt, W.J.P. : An operational coupled hybrid wave prediction model, Jour. Geophys. Res., Vol.89, No. C3, pp.3635~3654, 1984.
  - 6) Thornton, E. B. : Rederivation of the saturation range in the frequency spectrum of wind-generated gravity waves, Jour. Phys. Oceanogr., Vol.7, pp.137~140, 1977.
  - 7) 吉田賀一・光易 恒：風に逆行する波が存在する海面の力学過程, 日本海洋学会春季大会講演会要旨集, pp.289~290, 1986.
  - 8) Mitsuyasu, H. and Kusaba, T. : Drag coefficient over water surface under the action of strong wind, Jour. Natural Disas. Sci., Vol.6, No.2, pp.43~50, 1984.
  - 9) 佐藤昭二・合田良實：海岸・港湾, わかり易い土木講座17, 彰国社, p.104, 1972.
  - 10) Ross, D. B. : A simplified model for forecasting hurricane generated waves (Abstract), Bull. American Meteorol. Soc., No.113, 1976.
  - 11) 菅原一晃・小舟浩治・佐々木弘・橋本典明・亀山 豊・成田 明：沿岸波浪観測15か年統計(昭和45年~昭和59年), 港湾技研資料, No.554, 872 p., 1986.
  - 12) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学, 森北出版, pp.86~92, 1975. (1987.5.9・受付)
-