

論文

# 韓国沿岸における波高の極値の推定

畑田 佳男\*・山口 正隆\*・野中 浩一\*\*・大福 学\*・李 敏杰\*

## Estimation of Extremes of Wave Height around the Coasts of Korea

Yoshio HATADA\*, Masataka YAMAGUCHI\*, Hirokazu NONAKA\*\*, Manabu OHFUKU\* and Min Jie LI\*

### Abstract

Based on the wave hindcastings for historical storms over a period of 51 years and simulated typhoons over a period of 1000 years and their extreme value analysis, extremes of wave height at 9 points with a 50 m water depth properly selected along the coasts of Korea are estimated. Wind data for historical storms are made either by use of a parametric typhoon wind model for 450 typhoons from 1948 to 1998 or from the 31-year and 20-year analysis surface wind data archives respectively provided by NCEP/NCAR and ECMWF meteorological centers. Also, wind data for around 7800 typhoons simulated by using Monte-Carlo technique are generated by the same typhoon model. A shallow water wave prediction model based on backward ray tracing is applied on a nested grid with highly fine space resolution. Comparison between hindcast and measurement for wave height during the recent storms partly supports an applicability of the wave model. Extreme value analyses are conducted using the direction-free and direction-separated data of annual maximum wave height. The evaluated 100-year return wave heights are 7 m at the West and East coasts and 11 m at the South coast. The estimates at the typhoon-dominated West and South coasts using the simulation data are in reasonable agreement with those for historical storms.

キーワード：波高の極値，韓国沿岸，波浪推算，台風モデル風，表面風解析値，1点モデル，浅海波

Key words: extremes of wave height, coasts of Korea, wave hindcast, parametric typhoon model winds, analysis surface winds, backward ray tracing model, shallow water waves

\* 愛媛大学工学部環境建設工学科  
Department of Civil and Environmental Engineering,  
Faculty of Engineering, Ehime University

\*\* 愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程生産工学専攻  
Doctoral Course of Engineering for Productions, Graduate  
School of Science and Engineering, Ehime University

本論文に対する討論は平成14年11月末日まで受け付ける。

## 1. 緒言

沿岸部の開発・利用や災害防止にあたっては、来襲波の波高の極値を的確に推定する必要がある。このため、わが国では国の関係機関や大学などにおいて波浪推算に基づく沿岸部の波高の極値の推定が行われ、いくつかの成果<sup>1)~3)</sup>が報告されてきた。こうした事情は沿岸部の開発が積極的に推進されている隣国の韓国においても同様であると推測される。しかし、現段階では、その検討状況は日本で入手しうる形では公表されていないようである。

韓国沿岸の波浪に影響する気象擾乱には、5~10月に南方から進行してくる台風に加えて、夏季を除きほぼ年中発生する低気圧がある。韓国沿岸のうち、西岸や南西岸には水深100m以下の浅海域が広範囲に存在しているので、東シナ海から来襲する高波は海底地形の影響を強く受ける。西岸や南岸の地形は南部の済州島のほか多数の小群島や小半島などの存在により複雑になっているため、波浪に及ぼす沿岸地形の影響が大きい。東岸は水深の大きい日本海に面していることから、外海の波浪が直接入射する可能性がある。したがって、韓国沿岸に異常波浪を生起する気象擾乱や波高の極値は日本沿岸と同様に、地域ごとに異なると考えられる。

そこで本研究では、韓国沿岸全域に分布するように選択した9箇所の水深50m地点における波高の極値を、高地形解像度計算に有効に対応できる1点浅海モデル<sup>4)</sup>を用いて得た波浪推算資料の極値統計解析に基づいて推定する。極値解析は年最大波を対象として行う。対象とする気象擾乱は1948~1998年の過去51年間に北西太平洋上で生起した450ケースの台風および51年間連続した全気象擾乱、あるいは確率的台風モデル<sup>3)</sup>で発生した1000年間約7800ケースのシミュレーション台風である。

## 2. 波浪推算モデルと波浪推算条件

1点浅海モデル<sup>4)</sup>は計算対象地点に到達する各成分波の波向線上における方向スペクトルの発達・減衰および伝播計算から、1地点における波浪の

経時変化を算出する方法である。1点浅海モデルの基礎方程式は浅海におけるエネルギー平衡方程式であり、次式により表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F}{\partial t} + c_g \cos \theta \frac{\partial F}{\partial x} + c_g \sin \theta \frac{\partial F}{\partial y} + \\ & \frac{c_g}{c} \left( \sin \theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y} \right) \frac{\partial F}{\partial \theta} = cc_g S \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $F = cc_g E(f, \theta)$ 、 $c$ ：成分波の波速、 $c_g$ ：成分波の群速度、 $E(f, \theta)$ ：方向スペクトル、 $f$ ：周波数、 $\theta$ ：方位角、 $S$ ：エネルギーの流出入を表すソース関数、である。式(1)における左辺第2、第3項が方向スペクトルの移流、第4項が屈折、 $F = cc_g E(f, \theta)$ という表現がshoalingの影響を表す。本モデルはソース関数として、①Phillips機構による波の発生項、②Miles機構による波の発達項、③順風段階でのエネルギー減衰項、④逆風によるエネルギー減衰項、⑤底面摩擦によるエネルギー減衰項、を関数表示の形で考慮する。このうち、⑤の底面摩擦によるエネルギー減衰項 $S_{fb}$ は次式で表される。

$$S_{fb} = -C_f (\omega/g \sinh kh)^2 E(f, \theta) \quad (2)$$

ここに、 $\omega = 2\pi f$ ：角振動数、 $g$ ：重力加速度、 $k$ ：波数、 $h$ ：水深、 $C_f$ ：底面摩擦項に対して線形近似式を仮定する場合の底面摩擦係数、である。ここでは底面摩擦係数に $0.02\text{m}^2/\text{s}^3$ を与える。また、砕波によるエネルギー減衰は風波の発達段階における方向スペクトルが浅海における平衡方向スペクトルを越えないと仮定することにより評価する。

式(1)の数値積分には右辺を0とした移流方程式と、移流項を0とした発達・減衰方程式を1タイムステップ内で交互に解く時間分割法を用いる。まず、移流方程式の数値計算では、浅海波とみなせる低周波側の成分波( $kh \leq 6.5$ )に対してfull ray methodを、深海波( $kh > 6.5$ )とみなせる高周波側の成分波に対してpiecewise ray methodを適用する。ついで、発達・減衰計算では、移流計算結果を初期値とする発達・減衰方程式の解析解を使用する。

1点浅海モデル自体は成分波間の非線形相互作用を考慮しない第1世代に分類されるけれども、実用面では高地形解像度格子網上で効率的かつ比較的高い精度の計算を可能にし、精度の点では第3世代モデルであるWAMと比べて遜色ない<sup>5)</sup>。

波浪推算では、北緯約15~43°、東経約120~155°の北西太平洋領域を格子間隔 $\Delta x = 5\text{ km}$ で $673 \times 673$ に分割した大領域水深格子網に、格子間隔 $\Delta x = 0.5\text{ km}$ で分割した波浪推算地点周辺小領域水深格子網（海域が狭いウッリュウ島(Ullungdo)小海域では格子間隔 $\Delta x = 0.25\text{ km}$ の格子網）を組み込んだ高地形解像度2段階水深格子網を用いる。2段階水深格子網の使用は逆屈折法に基づく波向線計算を沿岸部においてできるだけ高い精度で行うためである。ただし、本研究における両水深格子網の格子間隔の比率は10:1となっており、多段格子網を用いた通常の計算ケースに比べてかなり大きい。しかし、韓国東岸小領域のように、小領域水深格子網が波浪推算で用いる最低周波数成分に対して水深波長比 $1/2$ 以上の水深をもつ海域を含んでいる場合には、屈折がほぼ小領域内で生じるので、屈折に及ぼす両格子

網の格子間隔比の影響は問題にならない。また韓国沿岸のうち、浅い水域が広がる東シナ海に面した西岸および南岸の海底勾配は約 $1/1000$ であるから、格子間隔 $5\text{ km}$ の大領域水深格子網および格子間隔 $0.5\text{ km}$ の小領域水深格子網における1格子分あたりの平均的な水深の変化量はそれぞれ $5\text{ m}$ および $0.5\text{ m}$ になる。一方、日本海に面した韓国東岸の海底勾配は約 $1/100$ 、格子間隔 $0.5\text{ km}$ の小領域水深格子網における1格子分あたりの平均的な水深の変化量は $5\text{ m}$ である。すなわち、格子間隔 $0.5\text{ km}$ の小領域水深格子網は、海底勾配が緩やかな韓国西岸および南岸のみならず、海底勾配が相対的に急な韓国東岸において、少なくとも水深 $50\text{ m}$ 地点に位置する波浪推算地点より深い小領域の海底地形を比較的高い精度で再現する。したがって、高地形解像度小領域格子網を組み込んだ2段階水深格子網の使用により、沿岸部における波浪の屈折を適切に評価することが可能になると考えられる。

Fig. 1は大領域格子網およびそのうちの韓国沿岸の拡大図を示しており、拡大図は波浪推算地点周辺の小領域の範囲を表す。Fig. 2は波浪推算地

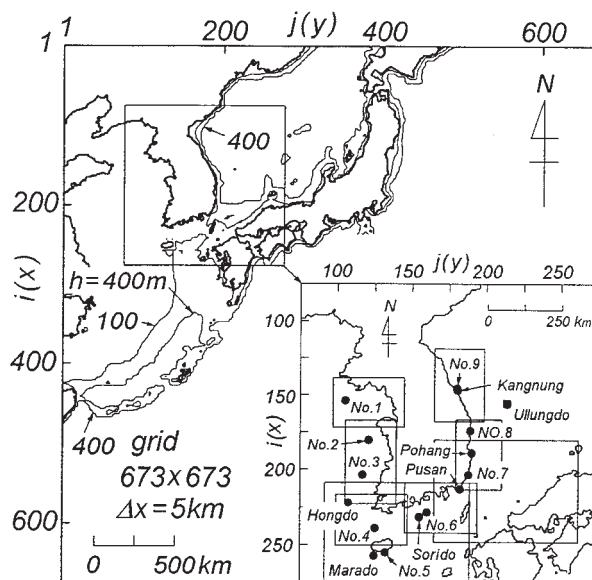


Fig. 1 Computation area on the Northwestern Pacific Ocean and the East China Sea, nested small sea areas and location of wave hindcast points.

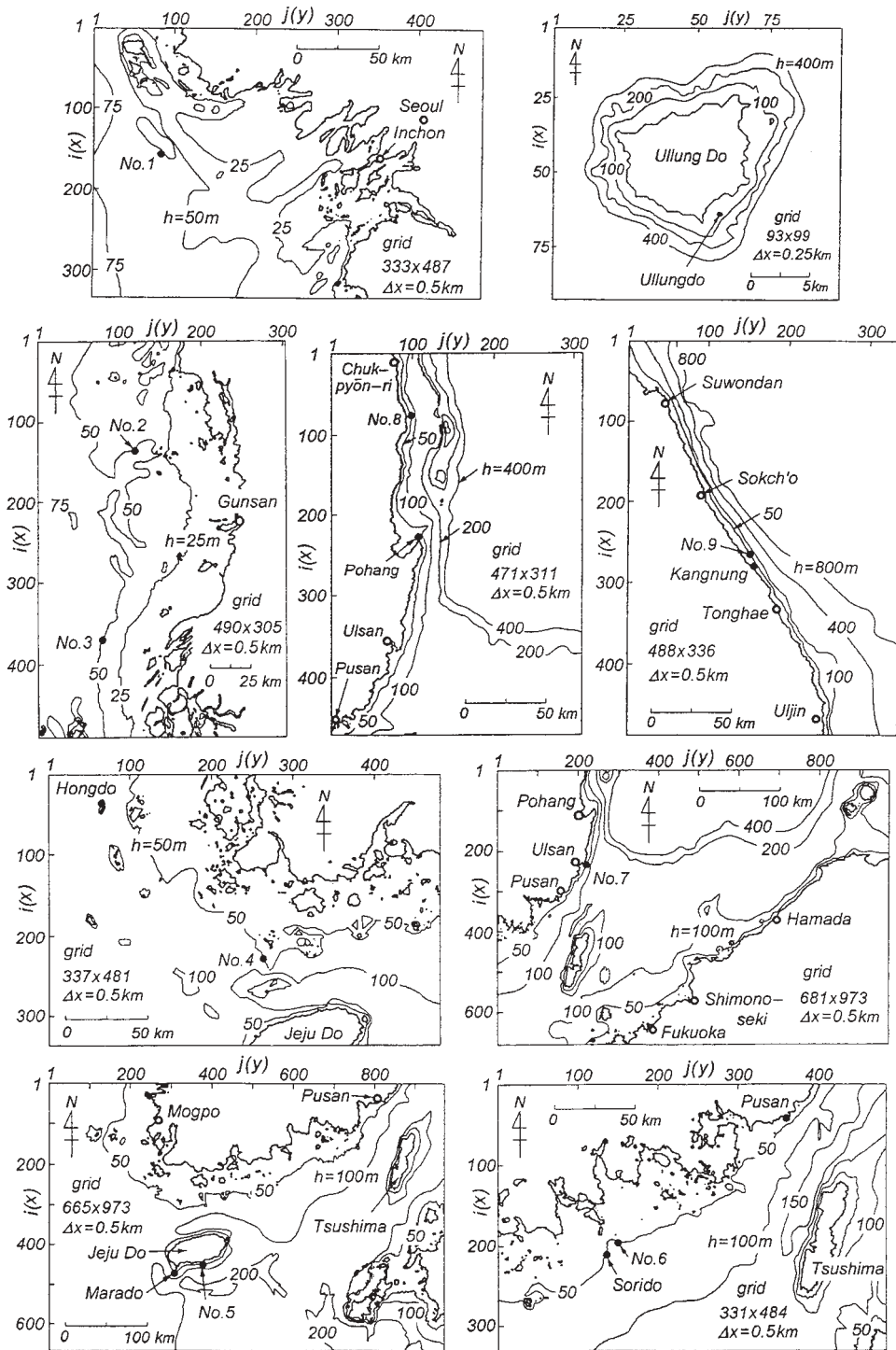


Fig. 2 Small sea areas embedded onto large sea area.

点周辺小領域格子網を示し、いずれも沿岸部の地形の細部を再現する。境界条件については、波浪推算地点より出発した各成分波の波向線先端が陸地境界に到達する場合、そこでの方向スペクトルの値を0とする。また波向線先端が開境界に到達する場合、台風モデル風資料を入力条件とするケースでは、局所風速および波向線先端位置と台風中心位置との距離の関数で表される Ross のハリケーンモデルに基づく JONSWAP 型周波数スペクトルと、局所風向に対応する  $\cos^4 \theta$  型方向分布関数の積で表される方向スペクトルの値を与える。また、表面風解析値資料を入力条件とするケースでは、局所風速に対応する修正 P-M スペクトルに、局所風向に対応する  $\cos^4 \theta$  型方向分布関数を乗じて得られる方向スペクトルの値とする。周波数データの個数は 0.04~0.50 Hz 間を不等分割した 23 個、方向データの個数は 0~360°を等分割した 37 個である。方向は N を 0°として反時計回りに定義する。波浪推算における計算時間間隔は 1 時間である。

波浪推算地点は、Fig. 1 に示すように、韓国沿岸全域を含むように選択した No. 1~No. 9 の 9 地点であり、いずれも水深 50 m の地点に位置する。これら 9 地点のうち No. 1~No. 3 地点は韓国西岸を、No. 4~No. 6 地点は南岸を、No. 7~No. 9 地点は東岸を代表する。水深 50 m 地点を選択したのは、韓国沿岸における波高の極値を地域によらず同一水深で評価するためである。このほか波浪推算の精度を検討するため、韓国沿岸

に配置されたブイによる波浪観測地点 6 箇所と水圧式波高計による波浪観測地点 (Kangnung) 1 箇所の計 7 箇所を波浪推算地点とする。波浪観測地点は Fig. 1 に地名を記入した位置である。

Fig. 3 は韓国西岸、南岸、東岸をそれぞれ代表する No. 2, No. 5, No. 7 地点における 10° 間隔の方向別対岸距離を示す。図において 2000 km 以上の対岸距離は省いている。韓国西岸の No. 2 地点は Gunsan (群山) の西北西 (WNW) 約 80 km に位置し、NNW~S 方向で対岸距離が 500 km を越える。このうち、NNW~WSW 方向が黄海方面に、SW~S 方向が東シナ海方面に対応する。No. 1, No. 3 地点も類似した方向別対岸距離をもつ。南岸の No. 5 地点は済州島南側沿岸部に位置し、WSW~SE 方向および ENE 方向の対岸距離が 500 km 以上に達する。朝鮮半島南部と済州島の間位置する No. 4 地点では、S~SE 方向が済州島により遮られる。朝鮮海峡西側に位置する No. 6 地点では、SSE~SE 方向の対岸距離が対馬の存在により短い。東岸の No. 7 地点は SSW 方向を朝鮮海峡・東シナ海に、E~NNE 方向を日本海に開いており、台風時には朝鮮海峡を通して SSW 方向から高波が伝播する。日本海に面する No. 8, No. 9 地点では、おおむね N~E 方向の対岸距離が 500 km を越える。一方、S 寄りの方向は陸上部にあたるので、その対岸距離は数 10 km 以下である。このように、各地点における方向別対岸距離が周辺地形に応じて異なるので、波浪にもその特徴が反映されることになる。

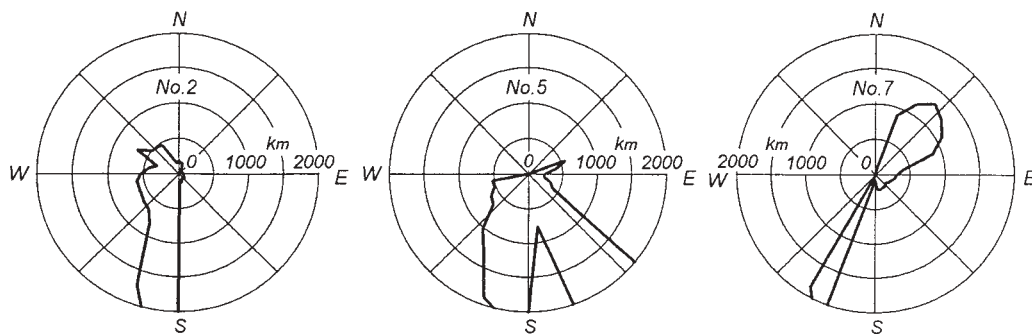


Fig. 3 Distribution of directional fetch at 3 selected wave hindcast points.

### 3. 海上風資料

#### 3.1 既往台風に伴う海上風資料

台風に伴う海上風の推定には、台風内の気圧分布を Myers 式で近似した場合の台風モデル法<sup>6)</sup>を用い、海上風への変換係数を 0.60 とする。波浪推算では、1948~1998 年の 51 年間に生じた 450 ケースの各台風に対してまず 6 時間間隔の台風の中心位置、中心気圧、台風半径、緯度によって決まる吹込み角（台風属性資料）を 1 時間ごとに線形補間する。ついで、これらの台風属性資料を入力条件として、北西太平洋領域に設けた格子間隔 80 km の格子網、波浪推算地点を囲む一辺 400 km の小領域に設けた格子間隔 10 km の格子網、および波浪推算地点で海上風を計算する。波浪推算地点で海上風を直接計算するのは、格子点値の補間に伴う海上風の平滑化の影響を避けるためである。また、波向線上の風は周囲 4 格子点の風速成分に対する 2 次元 1 次補間式の適用により求める。

#### 3.2 表面風解析値資料

本研究で用いる表面風解析値資料は、種々の気象要素の観測資料と気象モデルを用いて、アメリカ合衆国環境予測センター／大気研究センター NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)、およびヨーロッパ各国が共同運営しているヨーロッパ中期気象予報センター ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) がそれぞれ別個に全球規模で得た気象要素解析値資料のうちの 10 m 高度風速・風向資料である。ここでは、1948~1978 年の 31 年間の NCEP/NCAR 表面風再解析値資料と 1979~1998 年の 20 年間の ECMWF 表面風解析値資料よりなる計 51 年間の表面風解析値資料を用いる。

表面風解析値資料の時間間隔はいずれも 6 時間、NCEP/NCAR 風資料の空間解像度は約  $1.9^\circ$ 、ECMWF 風資料の空間解像度は  $1.125^\circ$  (1991 年 9 月 16 日以前) および  $0.5625^\circ$  (1991 年 9 月 17 日以降) となっている。したがって、ECMWF 風

資料の空間解像度、すなわち精度が NCEP/NCAR 風資料より高いので、1979~1998 年の 20 年間に對して ECMWF 風資料を波浪推算に用いる。このため、表面風解析値資料の空間解像度は 3 つの期間で異なることになる。韓国沿岸の大部分の地点では最大級の波浪は台風時に生じ、しかもこれは台風モデル法に基づく海上風を使用した場合に得られるので、波高の極値の推定結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。波浪推算では、NCEP/NCAR 風資料および ECMWF 風資料のいずれも、北西太平洋領域に設けた格子間隔 80 km の格子網上に 2 次元 1 次補間した風速成分を 1 時間ごとに線形補間することにより使用する。波向線上の風は周囲 4 格子点の風速成分に対する 2 次元 1 次補間式の適用により計算する。

#### 3.3 シミュレーション台風に伴う海上風資料

台風に伴う強風や高波は、著しい時空間変化を伴うので、台風の経路、中心気圧および移動速度など台風属性の偶然性に大きく左右される。しかし、現段階で入手しうる信頼性のある既往台風資料の期間は過去 50 年程度であるので、巨大台風に伴う異常波高がたまたま生じた場合には、既往台風資料に基づいて推定される波高の極値の推定値は大きく変化することも生じる。そこで、台風の統計的性質の解析に基づいて作成した台風属性（中心位置、中心気圧、台風半径）に関する確率的発生モデル、すなわち確率的台風モデルにより発生させたシミュレーション台風資料を波浪推算に用いることにより、長期の再現期間に対する台風時波高の極値を推定する。確率的台風モデルには、台風属性資料を全年、季節別、年代別および年代季節別に解析して作成した 4 種類がある。ここでは、年代季節別確率的台風モデル<sup>7)</sup>により格子間隔 80 km の北西太平洋領域で 6 時間ごとに発生した 1000 年間約 7800 ケースの各台風に対して、1 時間間隔で線形補間した台風属性資料を台風モデル法の入力条件として海上風を計算する。海上風の計算領域および波向線上の風の計算方法は 3.1 と同じである。1000 年というシミュレーション期間は、標本の大きさの増加による確

率波高推定値の統計的信頼性の向上と計算機能力の制約の両者を勘案して決定している。

#### 4. 年最大波資料の作成と極値統計解析

##### 4.1 既往気象擾乱資料に基づく年最大波資料

###### (1) 既往台風資料に基づく台風時年最大波資料

個々の既往台風を対象として、台風モデル法に基づく海上風を1時間ごとに与えて、平均的に1週間程度の継続時間をもつ台風時波浪を計算し、全方向および16方位別台風時最大波(波高・周期・平均波向)資料を抽出する。同様の操作を1948~1998年の450台風に対して繰り返し、全ケースの台風時最大波資料を得たのち、51年間の全方向および16方位別台風時年最大波資料を作成する。

###### (2) 表面風解析値資料に基づく年最大波資料

1時間ごとに線形補間した1948~1978年の31年間に及ぶNCEP/NCAR風資料を入力条件として、長期波浪推算を行い、31年間1時間間隔の波浪時系列資料から全方向および16方位別年最大波資料を抽出する。また、1979~1998年のECMWF風資料に対しても同様の計算を実施したのち、両資料を併せて1948~1998年の51年間の全方向および16方位別年最大波資料を作成する。各年の最大波の成因は台風あるいは台風以外の気象擾乱のいずれかであり、年ごとに異なる。

###### (3) 既往気象擾乱時年最大波資料の作成

上述した(1)の台風時年最大波資料と(2)の年最大波資料の波高を各年および各年の各方向ごとに比較して、大きい方の波高資料を採用することにより、1948~1998年の51年間の全方向および16方位別既往気象擾乱時年最大波資料を作成する。これは、表面風解析値資料の時空間解像度が不足しているため、時空間変化が著しい台風に対して波高が低めに評価される可能性があることや、台風モデル風は台風の影響が減少する領域に対して低めの風速を与えるので、推算波高も小さくなる傾向をもつことに対処するための便宜的な操作である。将来的には、表面風解析値資料への台風モデル風資料の埋込みを検討する必要もあるけれども、現段階では埋込みを行っていない。

##### 4.2 シミュレーション台風資料に基づく台風時年最大波資料

1000年間約7800ケースのシミュレーション台風のそれぞれに対して台風モデル法により1時間間隔で計算した海上風を入力条件とする波浪推算を実施する。各台風に対して台風別最大波資料を得たのち、1000年間の全方向および16方位別台風時年最大波資料を作成する。

##### 4.3 極値統計解析の方法

極値統計解析には、候補分布における尺度母数と位置母数の推定を線形最小2乗法に基づく合田<sup>8)</sup>のモデルを変更したYamaguchi & Hatada<sup>9)</sup>の拡張型モデルを用いる。拡張型モデルでは、Gumbel分布、形状母数 $k=0.5\sim 10$ の間の27個のWeibull分布および $k=2.5\sim 40$ の間の20個のFT-II型分布を候補分布として最適分布を見出す。その際の最適分布の判定には、相関係数 $\rho$ を最大とする基準を用いる。相関係数は波高資料の順序統計量と、合田<sup>8)</sup>のプロットング公式を用いた非超過確率の推定値によって各候補分布から算出される変量との間で算出する。確率波高は指定した再現期間に対して最適分布より求め、確率波高の分散(標準偏差)はjackknife法<sup>10)</sup>を適用して推定する。極値統計解析の実作業では、全方向および16方位別の既往気象擾乱による年最大波高資料(年数 $K=51$ 年)に対しては、限界波高 $H_c \geq 1$  mの資料、シミュレーション台風による年最大波高資料(年数 $K=1000$ 年)に対しては、限界波高 $H_c \geq 2$  mの資料を用いる。データ数は方向ごと、あるいは資料の種類(既往気象擾乱とシミュレーション台風)ごとに異なる。限界波高の設定は、年によってはかなり低い値をとる方向別年最大波高資料の影響を除去するためである。また、シミュレーション台風による年最大波高資料に対しては、確率的台風モデルが対象領域内で中心気圧980 hPa以下に発達した台風を対象として作成されているため、勢力の弱い台風により生起する年最大波高が適確に評価されない可能性を考慮したことによる。

さらに、全方向および16方位別の既往気象擾

乱による年最大波資料から波高と周期の相関図およびこれにあてはめた1次回帰式を作成し、確率波高に対応する周期を推定する。シミュレーション台風による年最大波資料の場合も同様の方法による。

## 5. 韓国沿岸における期間最大波高と確率波高の推定

### 5.1 観測波高資料との比較

韓国沿岸では、複数のブイによる波浪観測体制<sup>11)</sup>が1980年代後半以降に整備されている。この中で著者らの手元にある波浪観測資料は1998年のうちの3~12ヶ月相当分にすぎない。Table 1は波浪観測地点の名称、位置、水深、観測期間(月)、測得率の一覧を示す。ただし、Kangnungにおける波浪観測資料は水圧式波高計による。以下ではこの限られた資料を用いて波浪推算精度の検討を行う。

Fig. 4は、その位置をFig. 1およびFig. 2に示した7箇所の波浪観測地点における波高3m以上の異常気象擾乱時ピーク観測波高と推算波高を比較したものである。図中の白丸はECMWF風資料を入力条件とするケース、黒丸は台風モデル

風資料を入力条件とするケースを表す。1998年に韓国沿岸を直撃し高波をもたらした台風は台風9809号のみであるので、台風モデル風資料を入力条件とする推算波高資料はSoridoブイ、Pusanブイ、Maradoブイの3地点で得られているにすぎない。また観測時間間隔はPohangブイ、Maradoブイの2地点における1時間を除いて3時間である。波高変化が比較的緩やかな低気圧・季節風時には、観測波高はほぼピーク値をとらえていると考えられる。一方、台風時で波高変化が急激な場合には観測ピーク波高は低めの値となっている可能性がある。図によると、推算波高は台風に伴う高波高に対して観測波高よりやや大きめの値を与えるけれども、一般的な対応は比較的良好である。しかし後述するように、各地点の上位波高資料のほとんどは表面風解析値資料よりむしろ台風モデル風資料を入力条件とする波浪推算から得られるので、主としてECMWF風資料を入力条件とする波浪推算資料に基づく上記の結果は必ずしも波高の極値推定のための波浪推算の精度を確認したことを意味しない。したがって、今後長期の観測資料を入手し、とくに台風時異常波浪に対して台風モデル風資料を入力条件とする波浪

Table 1 Wave measurement stations deployed around coasts of Korea and conditions of wave records used for validation of wave model.

buoy	location	depth	meas. period	meas. rate
Hongdo	N34 ° 43 ' 30 " , E125 ° 11 ' 10 "	40 m	Jan.-May Sept.-Dec.	0.664 0.922
Marado	N33 ° 07 ' 15 " , E126 ° 15 ' 30 "	110 m	Apr.-Dec.	0.736
Sorido	N34 ° 16 ' 30 " , E127 ° 51 ' 00 "	60 m	Jul.-Dec.	0.414
Pusan	N35 ° 04 ' 18 " , E129 ° 06 ' 15 "	70 m	Aug.-Dec.	0.921
Pohang	N36 ° 05 ' 31 " , E129 ° 32 ' 42 "	30 m	Jan.-Mar. Jul.-Dec.	0.819 0.770
Kangnung*	N37 ° 47 ' 38 " , E128 ° 55 ' 53 "	15 m	Jan.-Dec.	0.925
Ullungdo	N37 ° 27 ' 41 " , E130 ° 53 ' 17 "	50 m	Jan.-Mar.	0.889

measurement year : 1998

\* : pressure gauge



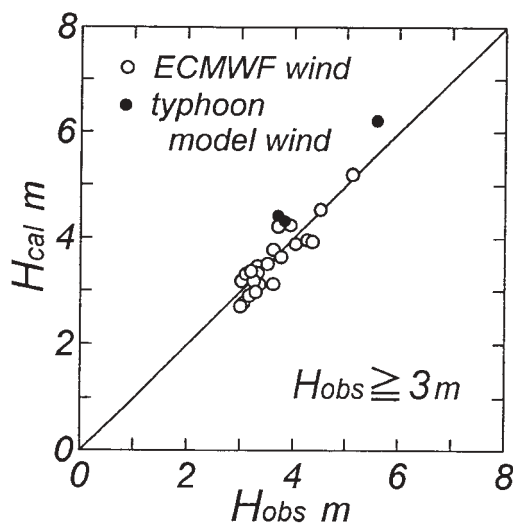


Fig. 4 Comparison between hindcast and measurement for peak wave height during a storm.

推算資料との比較検討を行う必要がある。

5.2 期間最大波高と気象擾乱

Table 2 は韓国沿岸 9 地点において 1948~1998 年の 51 年間に生じた第 1 位最大波(期間最大波)の波高  $H_1$ , 周期  $T_1$ , 波向  $\bar{\theta}_1$  と台風名あるいは年月日, 第 1 位波高と第 2 位波高の差 ( $\Delta H$ ) の一覧表を示し, Fig. 5 は期間最大波の沿岸分布を表す。第 1 位波高は, 日本海に面する韓国東岸の No. 8, No. 9 地点を除く 7 地点で, 台風 7207 号, 4806 号, 8613 号, 8705 号, 5914 号のいずれかの台風時に生じており, 比較的大きな波高差  $\Delta H$  をとる地点も多い。このことから, 韓国沿岸における過去 51 年間の最大波高は東岸中央部以北を除いて上記 5 台風のいずれかにより生じたかと推測される。

韓国沿岸全域の状況を Fig. 5 に従ってみると, 第 1 位波高は, 南岸 3 地点のうち済州島の遮蔽効果を受ける No. 4 地点を除いて 10~11 m と大きく, 西岸や東岸で 7 m 前後と相対的に低いことや, 周期も同様の沿岸分布を示すことがわかる。波向は西岸から南岸および東岸南部で SE~SW と S 寄り, 東岸中央部以北で NNE をとり, 各地点

Table 2 The largest waves during the past 51 years based on wave hindcastings around coasts of Korea and name of generating typhoons or date.

No.	$H_1$	$\Delta H$	$T_1$	$\bar{\theta}_1$	storm
1	7.48	1.06	11.7	199	T7207
2	6.84	0.63	10.7	133	T4806
3	6.72	0.46	10.7	128	T4806
4	7.83	0.48	11.7	129	T8613
5	10.07	0.29	12.9	163	T8613
6	10.92	0.82	13.8	186	T8705
7	6.72	0.27	10.8	223	T5914
8	6.73	0.37	12.8	331	870203*
9	7.06	0.27	11.9	337	870203*

\* : date (870203 : Feb., 3, 1987)

$H_1, \Delta H$  : m,  $T_1$  : s,  $\bar{\theta}_1$  : degree

の地理条件に応じて変化することもうかがえる。このほか, 韓国沿岸で生じた高波の上位値に関して次の特徴を指摘できる。すなわち, 西岸 3 地点は S 方向のみならず W 方向からの風に対して波浪が発達する海域に位置し, しかも西岸 3 地点に高波をもたらす台風の来襲頻度が必ずしも多くない。そのため, 最上位近くの波高は台風に起因する一方, それ以下の上位波高が台風以外の気象擾乱時に生起することも少なくない。とくに No. 3 地点で, この傾向が強い。また, 南岸 3 地点では少なくとも 10 位までの波高が台風時に生起している。要するに, 南岸では他の沿岸域に比べて波高の極値に及ぼす台風の影響が卓越し, 波高も大きい。

東岸 3 地点のうち No. 7 地点は, 朝鮮海峡の位置する SSW 方向に長い対岸距離をもつ点で, 方向別対岸距離分布が他の 2 地点と異なり, そこで第 1 位波高は台風 5914 号時に生起している。一方, 東岸中央部以北に位置する No. 8, No. 9 地点における第 1 位波高は, いずれも 1987 年 2 月初めの低気圧時に生起している。これは日本海北西部領域における小低気圧の東進と優勢な大陸

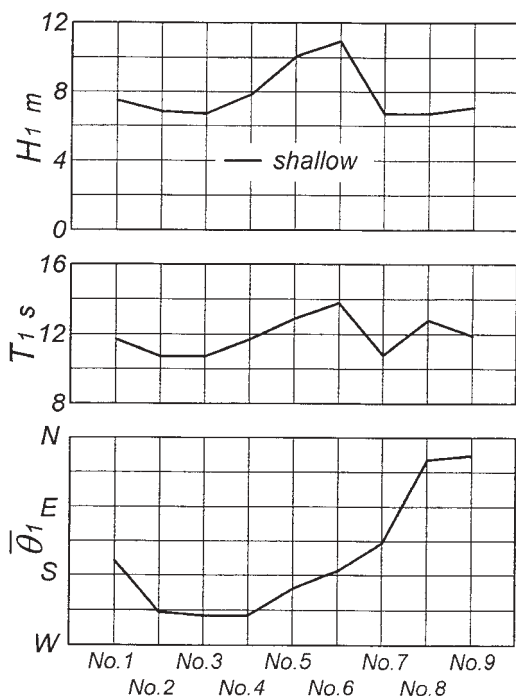


Fig. 5 The largest waves during the past 51 years based on wave hindcastings around coasts of Korea.

高気圧の張出しに伴い長時間吹送した N~NE 方向の強風に起因する。類似した気象パターンに伴う強風が 1971 年 1 月 3~4 日にかけて出現しているけれども、波浪推算で使用した NCEP/NCAR 風資料の地形解像度が低いため、両地点における推算波高も 5 m 以下の値をとっている。そこで、天気図解析法に基づく海上風資料を入力条件として、格子間隔 5 km の日本海領域で 1 点浅海モデルを用いた波浪推算<sup>1)</sup>を試行的に実施した。推算波高は No. 8, No. 9 地点でそれぞれ 6.83 m および 7.35 m であった。これらの値は 1987 年 2 月初めの低気圧時最大波高より 0.1~0.3 m 大きい。したがって、No. 8, No. 9 地点における期間最大波高が 1971 年 1 月 3~4 日の低気圧時最大波高に置き換わることになるけれども、波浪推算の条件が異なるので、必ずしも断定的なことは云えない。

Fig. 6 は No. 1~No. 7 地点にそれぞれの第 1

位波高をもたらした台風 7207 号 (No. 1 地点), 4806 号 (No. 2, No. 3 地点), 8613 号 (No. 4, No. 5 地点), 8705 号 (No. 6 地点), 5914 号 (No. 7 地点) の経路を一括して図示したものである。Fig. 7 は韓国で想定されている A, B, C 級モデル台風の経路模式図を表す。モデル台風の勢力は C, B, A 級台風の順に、すなわち韓国南側を通過する台風ほど強くなる。経路別分類によると、台風 5914 号は A 級, 8705 号は B 級, 8613 号は B 級と C 級の間、4806 号は C 級に属する。一方、台風 7207 号は中心気圧 970 hPa を保ちながら黄海を朝鮮半島に沿って NW 方向に進行しており、いずれの範疇にも属さない特異な経路をもつ。台風 7207 号時には、その NW 方向への進行に伴って SE 寄りの強風が長時間吹送した結果、No. 1 地点に SSE 方向の異常波浪が生起したと推測される。しかし、こうした経路をとる勢力の強い台風の生起頻度は過去約 50 年間の既往台風の経路をみても 10 個以下と少ないうえに、台風 7207 号クラスの中心気圧をもつ台風は生起していない。

Fig. 8 は 1000 年間のシミュレーション台風のうち、No. 1~No. 7 地点に第 1 位波高を生起した台風の経路を示す。No. 1 地点に第 1 位波高をもたらした台風は、既往の台風 7207 号と同様に、黄海を朝鮮半島に沿って NW 方向に進行する経路をとっている。また、No. 2~No. 7 地点に第 1 位波高をもたらした台風は、東シナ海から黄海を N~NNE 方向に進行したのち、韓国を NNE 方向あるいは NE 方向に横断する経路をとる。そして、南側あるいは南東側の地点に第 1 位波高をもたらした台風ほど、その経路は東側に位置する。これらは既往台風の経路とおおむね符合する。もちろんシミュレーション台風資料の期間が長いので、第 1 位波高を生起した台風の経路は既往台風の経路と異なる場合もありうる。

### 5.3 確率波高

9 地点における全方向および 16 方位別既往気象擾乱時年最大波高資料およびシミュレーション台風時年最大波高資料に極値統計解析モデル<sup>9)</sup>を適用して、最適分布の特定と確率波高およびその

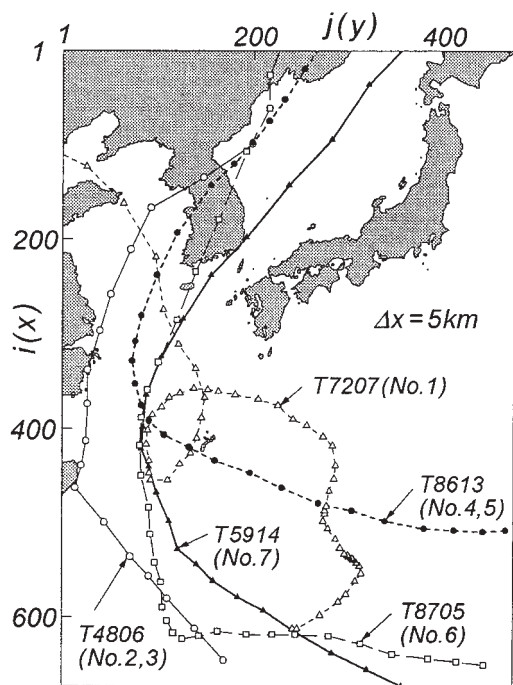


Fig. 6 Tracks of historical typhoons which generated the largest waves during the past 51 years around coasts of Korea.

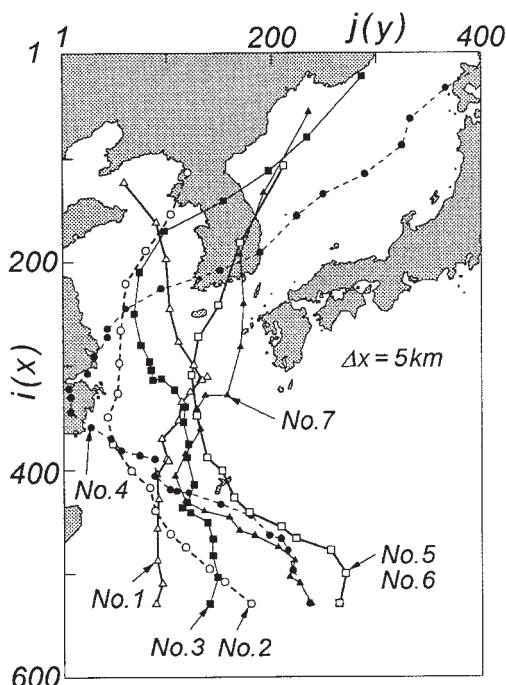


Fig. 8 Tracks of hypothetical typhoons based on Monte-Carlo simulation which may generate the largest waves around coasts of Korea.

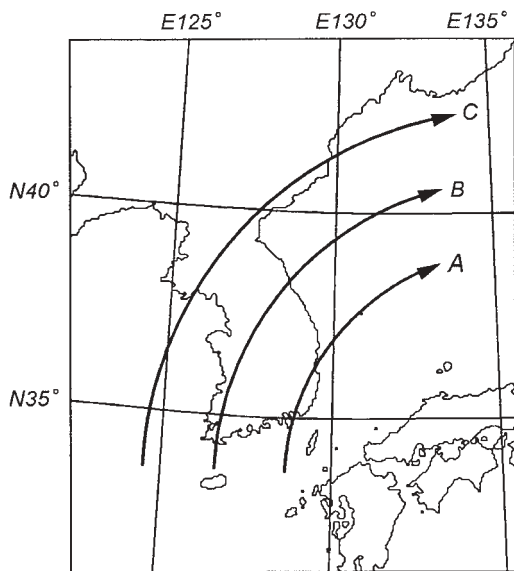


Fig. 7 Schematic tracks of hypothetical typhoons which may generate the expected largest waves around coasts of Korea.

標準偏差の推定を行う。さらに、年最大波高資料と周期資料より作成した1次回帰式に基づいて確率波高に相当する周期を算定する。

Fig. 9 は全方向既往気象擾乱時年最大波高資料に対する Q-Q プロットを済州島南岸の No. 5 地点について例示する。Q-Q プロット図は資料値  $H_{data}$  を横軸、最適分布を用いた場合の資料値に相当する非超過確率に対応する計算値  $H_{cal}$  を縦軸として描かれる。この場合の相関係数  $\rho$  は 0.996 であり、最適分布の適合度が高く、個々の計算値と資料値はよく符合する。また、最適分布は形状母数  $k=1.9$  の Weibull 分布で表される。

Fig.10 は No. 5 地点における全方向既往気象擾乱時年最大波高とこれに付随する周期との相関図、および両者の関係を近似する 1 次回帰式を表す。回帰式は再現期間数十年以上の確率波高、すなわち高波高に相当する周期を推定するために使用す

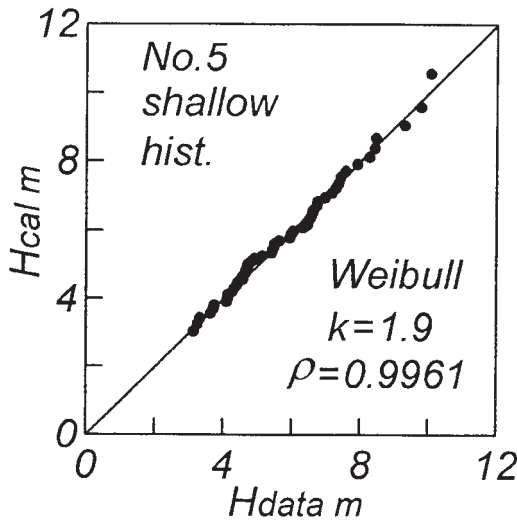


Fig. 9 Q-Q plot for data of annual maximum wave height generated by historical storms during the past 51 years at a selected point of Korea coast.

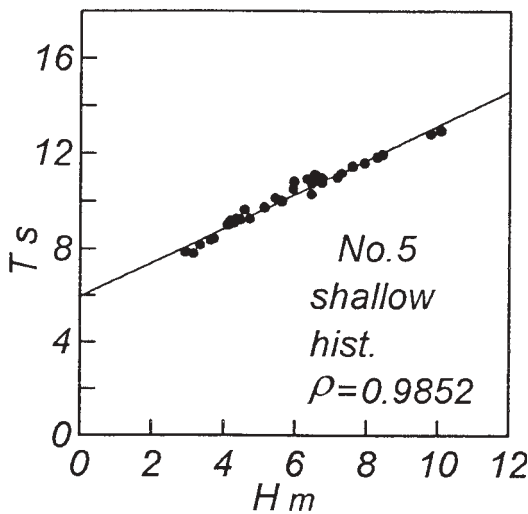


Fig. 10 Correlation diagram between annual maximum wave height and associated wave period, and linear regression equation at a selected point of Korea coast.

るので、波高と周期の相関係数ができるだけ大きくなるように、資料値の全体的傾向からはずれる低波高資料を削除して作成している。したがって、

回帰式の相関係数  $\rho$  は 0.985 とかなり大きくなり、回帰式は資料値の平均的傾向を高い精度で近似する。

Table 3 は No. 5 地点について、全方向および 16 方位別既往気象擾乱時年最大波高資料に対する極値統計解析から得た相関係数  $\rho$ 、最適分布（いずれも Weibull 分布）の形状母数  $k$ 、100 年確率波高  $H_{100}$  とその標準偏差  $\sigma_{100}$  および相当周期  $T_{100}$  の一覧を示す。方向別年最大波高資料に対する極値統計解析は方向別期間最大波高が 3 m 以上の方向について行っているため、No. 5 地点における方向別確率波高は WSW～E の範囲で得られている。相関係数  $\rho$  は 16 方位別資料の場合 SSW と ESE 方向を除いて 0.993 より大きいので、適合度はかなり高い。形状母数  $k$  は 1.3～3.0 の範囲にあり、方向別確率波高が大きい場合に小さい傾向にある。これは異常波浪ほど生起頻度が低いので、方向別年最大波高資料に対する最適分布が正側に長く裾を引く形状となる傾向を反映する。100 年確率波高と標準偏差および周期の推定値は全方向資料では  $10.70 \pm 0.60$  m, 13.7 s, 16 方位別資料ではその最大値は波向 S の場合に  $10.55 \pm 0.83$  m, 13.7 s である。すなわち、両者の確率波高はほぼ符合するけれども、後者では標準偏差が大きくなって確率波高の信頼度がやや低下している。

つぎに、韓国沿岸全域における確率波高の特徴を検討する。Table 4 は No. 1～No. 9 地点における全方向既往気象擾乱時年最大波高資料に対する極値統計解析結果の一覧である。東岸の No. 8, No. 9 地点では、全方向既往気象擾乱時年最大波高資料において 1971 年の年最大波高値を 5.2 で述べた 1971 年 1 月 3～4 日の低気圧時最大波高に置き換えることにより、極値統計解析を改めて行った。この結果によると、最適分布の形状がわずかに平坦になる以外、100 年確率波高と標準偏差にはほとんど変化がみられなかったため、推定結果を変えずに記載している。しかし、No. 8, No. 9 地点における年最大波高資料は、表面風再解析値資料の地形解像度の不足により、低めに算定された上位の波高資料を含むので、確率波高も

過小評価されている可能性があることに留意すべきであろう。

既往気象擾乱時資料の場合、相関係数  $\rho$  は西岸の No.1 地点および東岸の No.9 地点を除き 0.993 以上であり、最適分布の適合度がかなり高い。最適分布は第 1 位波高が突出する西岸の No.

Table 3 Results of extreme value analyses for direction-free and direction-separated data of annual maximum wave height at a selected point of Korea coast.

dir.	$\rho$	k	$H_{100}$	$\sigma_{100}$	$T_{100}$
all	0.9961	1.9	10.70	0.60	13.7
WSW	0.9952	2.6	3.18	0.13	8.5
SW	0.9945	1.3	7.92	0.70	11.8
SSW	0.9869	1.3	10.19	0.89	13.2
S	0.9941	1.4	10.55	0.83	13.7
SSE	0.9933	1.7	10.23	0.70	13.9
SE	0.9946	2.4	8.97	0.50	13.1
ESE	0.9857	2.0	6.58	0.36	12.1
E	0.9954	3.0	3.33	0.12	8.9

k : Weibull,  $H_{100}$ ,  $\sigma_{100}$  : m,  $T_{100}$  : s

Table 4 Results of extreme value analysis for data of annual maximum wave height in cases of historical storms around coasts of Korea.

No.	$\rho$	k	$H_{100}$	$\sigma_{100}$	$T_{100}$
1	0.9891	F6.0	7.27	0.80	11.4
2	0.9980	G	6.89	0.39	11.4
3	0.9928	W1.8	6.83	0.27	11.3
4	0.9956	W1.2	7.90	0.62	11.8
5	0.9961	W1.9	10.70	0.60	13.7
6	0.9959	W1.4	11.22	0.89	14.2
7	0.9941	W2.2	7.01	0.28	11.2
8	0.9978	W2.2	6.88	0.24	11.3
9	0.9766	G	7.15	0.46	11.3

$H_{100}$ ,  $\sigma_{100}$  : m,  $T_{100}$  : s

G : Gumbel, W : Weibull, F : FT-II

1 地点では、正側に長く裾を引く形状母数  $k=6.0$  の FT-II 型分布で表される。また、東岸の No.7 地点や No.8 地点では、最適分布は尖った形状をとる形状母数  $k=2.2$  の Weibull 分布で表される。その他の地点のうち、最上位近くの波高の差が小さい地点では Weibull 分布の形状母数の値が大きく、差が大きい地点では形状母数の値が小さい傾向にある。

Fig.11 は、Table 4 の全方向既往気象擾乱時年最大波高資料に基づく結果 (hist.) を用いて作成した 100 年確率波高  $H_{100}$  とその標準偏差  $\sigma_{100}$  および周期  $T_{100}$  の沿岸分布を表す。図は No.1 ~No.7 地点の全方向シミュレーション台風時年最大波高資料 (simu.) に基づく結果も与えており、図の錯綜を避けるため、各地点の結果を右へ少しずらしてプロットしている。これは高波に及ぼす台風の影響が卓越する地点に限定して、シミュレーション台風資料に基づく結果と既往気象擾乱時資料に基づく結果の相互関係を検討するためである。

さて、既往気象擾乱時資料に基づく 100 年確率

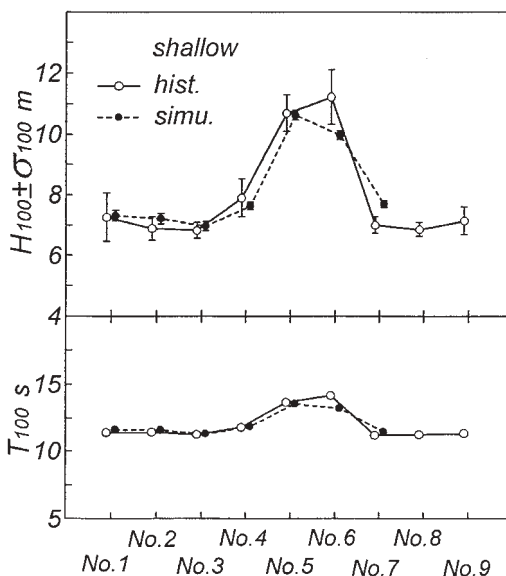


Fig. 11 100-year return wave height associated with standard deviation and corresponding wave period in cases of historical storms and simulated typhoons around coasts of Korea.

波高は西岸3地点や東岸3地点で約7mと同程度の値になり、南岸のうち済州島の遮蔽効果を受けるNo.4地点でも8m程度である。一方、台風に伴う高波が直接入射する南岸のNo.5, No.6地点では11m前後の値をとる。標準偏差に対する変動係数は西岸で4.0~11.0%, 南岸で5.6~7.9%, 東岸で3.5~6.4%となり、南岸のNo.4, No.6地点のほか西岸のNo.1地点でとくに大きい。後者は台風7207号時に生起した第1位波高が突出した値をとり、その結果、最適分布が正側に長く裾を引く形状母数 $k=6.0$ のFT-II型分布で表されるためである。また、各地点の100年確率波高に対応する周期は波高とほぼ線形関係にあり、概略値として確率波高7mに対して11.3s, 10mに対して13.2sをとる。

シミュレーション台風時資料に基づく100年確率波高は全般的に既往気象擾乱時資料に基づく結果とよく符合する。ただし、南岸のNo.6地点で1.2m低い値を与える。同様の結果は周期についてもみられる。No.6地点では既往気象擾乱時資料における第1位波高および第2位波高が第3位以下の波高に比べて突出するため、100年確率波高も大きくなる。これに対して、データ期間がきわめて長いシミュレーション資料の場合には、最大級の異常波高は1000年間の年最大波高資料における上位値として処理されるので、100年確率波高は過大な値をとらない。したがって、両資料に基づく確率波高に有意な波高差が現れると推測される。以上のように、過去50年程度の既往台風時年最大波高資料には出現確率の低い巨大台風に伴う異常波高資料が含まれることもあるので、確率波高のみならずその標準偏差の推定値が大きくなる事態は十分に生じうる。また、シミュレーション台風時資料に基づく100年確率波高の標準偏差は、シミュレーション期間が長くデータ数が多いことから、0.12~0.18mと非常に小さい。

Fig.12は方向別100年確率波高の沿岸分布を既往気象擾乱時資料およびシミュレーション台風時資料(No.1~No.7地点)について示したものであり、全方向100年確率波高の沿岸分布も同時に与える。既往気象擾乱時資料の場合、方向別確

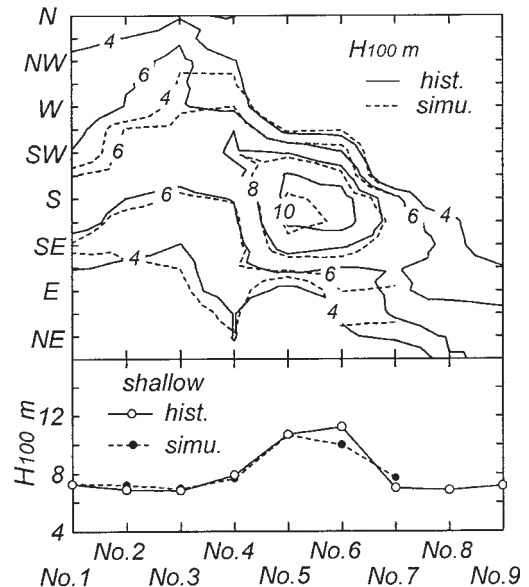


Fig. 12 Direction-separated 100-year return wave height in cases of historical storms and simulated typhoons around coasts of Korea.

率波高が最大の値をとる方向は西岸のS, SW方向から南岸のS方向を経て東岸のENE方向に変化し、南岸で方向別確率波高が最も大きい。また有意な値をもつ方向別確率波高の方向も同様に变化する。その幅は台風のみならず低気圧の影響を強く受ける西岸で広く、台風の影響が卓越する南岸や低気圧の影響が増大する東岸で狭くなっている。シミュレーション台風時資料に基づく方向別確率波高も類似した沿岸方向変化を示す。しかし、有意な大きさの方向別確率波高を与える方向の幅が西岸で縮小する。

Fig.13はシミュレーション台風時資料に基づく方向別および全方向1000年確率波高 $H_{1000}$ の沿岸分布(No.1~No.7地点)を表す。100年確率波高と比べると、10倍の再現期間の拡大に対して全方向1000年確率波高は西岸で1.7m(1.23倍)、南岸で1.3~1.9m(1.17倍)、東岸で1.1m(1.14倍)増加し、西岸3地点と南岸のNo.4地点および東岸のNo.7地点で8.5~9.0m、南岸のNo.5, No.6地点で12m前後の値をとる。また、方向別1000年確率波高も方向別100年確率波高

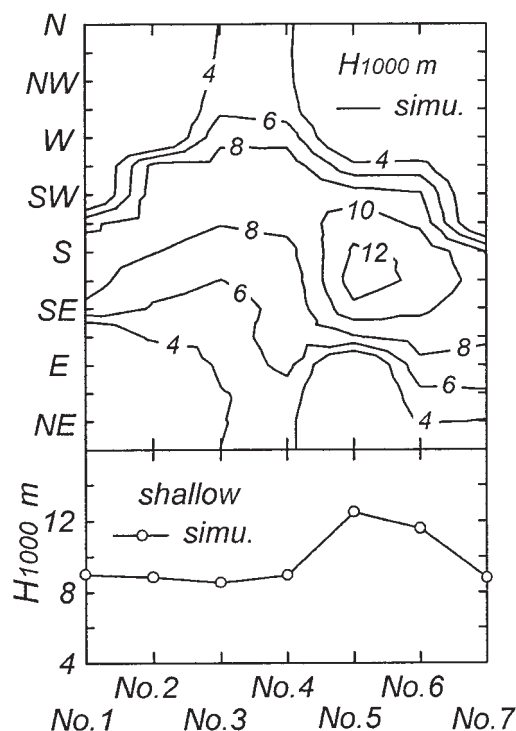


Fig. 13 Direction-separated 1000-year return wave height in case of simulated typhoons around coasts of Korea.

と比べて1.0~2.0 m (1.20~1.25倍) 増加するけれども、平面分布の状況はあまり変化しない。

## 6. 結語

本研究では、韓国沿岸全域に分布する9地点において実施した過去51年間の台風や全気象擾乱、および1000年間のシミュレーション台風に対する浅海波浪推算に基づいて、各地点の期間最大波高や確率波高を推定し、これらの沿岸分布を考察した。得られた結果の概要は以下のようなものである。

①韓国沿岸の水深50 m地点における過去51年間の期間最大波高とその波向は、西岸で6.7~7.5 m (SSE~SW)、南岸で7.8~10.9 m (SW~S)、東岸南部で6.7 m (SE)、東岸中央部以北で6.7~7.0 m (NNE) であり、期間最大波高は東岸中央部以北の2地点を除き、台風時に生起している。つまり、韓国西岸から南岸を経て東岸南部に

至る広範な沿岸域では、期間最大波高に係わる台風の影響が大きい。台風に伴う期間最大波高は韓国をNNE~NE方向に横断する台風時に発生している。しかし、西岸北部に位置するNo.1地点の期間最大波高は、黄海を朝鮮半島に沿ってNW方向に進行するという特異な経路をとった台風7207号による。

②100年確率波高は西岸で7 m、南岸のうち外海に面した地点で11 m、南岸のうち済州島の遮蔽効果を受けるNo.4地点で8 m、東岸で7 mと評価される。100年確率波高の標準偏差に対する変動係数は3.5~11.0%の範囲にある。変動係数はとくに第1位波高が突出するNo.1地点で11.0%、済州島の遮蔽効果により上位波高が周辺地点より小さいNo.4地点、および9地点のうち確率波高が最大の値をとるNo.6地点で、それぞれ7.8%および7.9%の値を示し、これらの地点では確率波高推定値の信頼度が低下する。また、方向別確率波高の最大値は全方向資料に基づく確率波高とほぼ符合し、方向別確率波高は各地点の地理条件に対応した方向変化を示す。ただし、低気圧時波浪の影響が大きい東岸中央部以北のNo.8、No.9地点では、表面風再解析値資料の地形解像度の不足に伴い、年別最大波高や確率波高が低めに評価されている可能性があるため、これらの推定値には再検討の余地がある。

③台風の影響が大きい韓国西岸、南岸および東岸南部では、長期間のシミュレーション台風時資料に基づく確率波高は既往気象擾乱時資料に基づく確率波高とおおむね符合し、しかもその標準偏差に対する変動係数は1.5~2.5%と小さいことから、シミュレーション台風時資料を用いる方法は100年以上の再現期間に対する台風時波浪の極値の推定に有効と考えられる。

最後に、NCEP/NCAR表面風再解析値資料およびECMWF表面風解析値資料をそれぞれ提供戴いたNCAR(アメリカ合衆国大気研究センター)およびECMWF(ヨーロッパ中期気象予報センター)ならびに本研究の端緒を与えて戴いた韓国(株)唯一総合技術代表理事の李 義允氏に謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 山口正隆・畑田佳男・中村雄二：波浪追算に基づく日本海沿岸での波高の極値の推定, 自然災害科学 JJSNDS, 13-2, pp.173-191, 1994.
- 2) 山口正隆・畑田佳男・佐藤 尚：波浪追算に基づくわが国太平洋岸での台風発生最大波高の沿岸分布の再検討, 自然災害科学 JJSNDS, 13-3, pp.255-270, 1995.
- 3) 山口正隆・畑田佳男・大木泰憲・西村教博・中村雄二：確率的台風モデルに基づく台風時浅海波高の極値推算システムの適用性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.246-250, 1995.
- 4) 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博：一地点を対象とした浅海波高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.
- 5) 畑田佳男・山口正隆・大福 学：1 点浅海モデルおよび WAM による長期波浪推算結果の相互比較, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.271-275, 1999.
- 6) 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, pp.104-106, 1972.
- 7) 畑田佳男・山口正隆・平田敬之：北西太平洋および東シナ海における台風発生波高の極値の推定, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.236-240, 1996.
- 8) 合田良實：港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説—, 鹿島出版会, 333 p., 1990.
- 9) Yamaguchi, M. and Y.Hatada : An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES97, Vol.2, pp.932-946, 1997.
- 10) Miller, R.G. : The jackknife -a review-, Biometrika, Vol.161, pp.1-15, 1974.
- 11) Park, K.S., Lee, D.Y., Kim, C.S., Kang, S.W., Bahk, K.S., Jeon, K.C., Kim, S.I., Shim, J.S. and B.C. Oh : Wave monitoring system of the Korea Maritime and Port Administration, Proc. HYDRO-PORT' 94, Vol.1, pp.83-92, 1994.

(投稿受理：平成13年6月18日  
訂正稿受理：平成13年11月28日)