

燧灘および播磨灘における台風時波高の極値の推定

山口正隆*・野中浩一**・畑田佳男***
大福 学****・増田真慈*****

燧灘および播磨灘における台風時波高の極値を, 過去 55 年間の多数ケースの台風に対する浅海波浪推算より得た台風時年最大波高資料の極値統計解析に基づいて検討するとともに, 台風 0310 号時の波高特性を調べた。そして, 50 年確率波高は燧灘で 3~4 m, 播磨灘で 3.5~4.3 m であること, 期間最大波高は両灘の南側海域では台風 6118 号に伴う波高が突出した期間最大波高となるために, 50 年確率波高を 1 m 前後越えること, 台風 0310 号は四国沿岸海域に, 長い高波継続時間をもつ, 過去 55 年間の第 2~3 位に相当する波高を生起したこと, および推算結果の妥当性は観測資料に基づく結果との比較的良好な対応によりある程度裏付けられることを示した。

1. 緒 言

瀬戸内海沿岸における来襲波浪はその規模において, 外洋に面した太平洋岸や日本海沿岸の波浪と比べるまでもないが, 燧灘の四国沿岸における台風 0310 号時の波浪災害の事例にみるように, 瀬戸内海中央部に位置する燧灘や隣接する播磨灘のような狭い海域の沿岸防災対策においても, 波浪の影響は無視しえない。しかし, そこでの波高の極値, とくに確率波高の推定研究の事例は見当たらない。

本研究では, 燧灘および播磨灘における波高の極値は台風時波高によって支配されるという前提条件のもとに, 過去 55 年間の多数ケースの台風と台風 0310 号について, 台風モデル法による海上風推算, 浅海波浪推算およびこれから得た台風時年最大波高資料に対する極値統計解析を行い, 両海域における台風時波高の 50 年再現確率値とその標準偏差ならびに期間最大波高, さらに台風 0310 号時最大波高の特性を検討する。

2. 波高極値の推定方法

(1) 海上風推算の方法

海上風の推算には, 台風内気圧分布を楕円型分布で近似して求められる中心対称傾度風と台風の進行に伴う場の風をベクトル合成する, 拡張型台風モデル法(野中ら, 2000)を用いる。すなわち, 天気図より得た 6 時間間隔の台風中心位置, 中心気圧, 台風半径, 楕円長・短軸方向台風半径比および楕円長軸傾斜角の 6 変量からなる台風属性資料の 15 分間隔線形補間値を入力条件として, 海上風を算出する。海上風への変換においては, 緯度に依存する吹込み角を考慮するとともに, 傾度風および場の風の風速にそれぞれ異なる係数を乗じる。傾度風速に乗

ずる係数の算定には, 台風中心からの距離に依存して値が変化する光田・藤井 (1997) による supergradient 風への変換係数式を用い, 台風中心付近の風速の増強をはかる。この場合, 遠方場の値を 0.54, 当該式での中心気圧深度の上限を 70 hPa とする。後者は過大な風速の出現を避けるためである。また, 台風場の移動に伴う風速に乗ずる係数には 0.6 を与える。

(2) 波浪推算の方法

計算対象領域は格子間隔 $\Delta x = 2$ km で南北方向 37, 東西方向 43 に分割した燧灘領域および南北方向 49, 東西方向 74 に分割した播磨灘領域である。鳴門海峡と明石海峡から伝播する波浪を評価するため, 後者は大阪湾の全域と紀伊水道の一部を含むように拡張している。波浪推算には, 砕波変形を段波モデル (Battjes・Janssen, 1978; 山口ら, 1990) で近似した第 2 世代浅海波浪推算モデル (山口ら, 1984) を用いる。周波数データの個数は 0.09~1.0 Hz 間を不等分割した 20 個, 方向データの個数は 0~360° を等分割した 19 個, 計算時間間隔は 3 分である。海上風は 15 分の間一定とする。境界条件として, 両灘とも周囲を陸で囲まれた閉鎖海域と仮定して, 陸上格子点での方向スペクトル値に 0 を与える。

推算対象台風は 1948~2002 年の 55 年間で燧灘・播磨灘に有意な波高を生起したと考えられる 366 ケースおよび 2003 年 8 月の台風 0310 号である。波浪推算は各台風を対象として台風が日本周辺に位置する 48 時間程度の期間に対して行い, 格子点別に台風時最大波高を求めたのち, 1 年間の台風に対する同様の計算から台風時年最大波高を得る。

(3) 極値統計解析の方法

極値統計解析には, 格子点別に求めた過去 55 年間の台風時年最大波高資料のうち 0.5 m 以上の資料に, 母数推定を線形最小 2 乗法による極値統計解析モデル (合田, 1990; Yamaguchi・Hatada, 1997) を適用する。小波高資料の削除は, 場合によっては台風時年最大波高を生起したかもしれない, 勢力の弱い台風を波浪推算の対象としていない点を考慮するとともに, 最適分布の適合度を

* 正 会 員 工 博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

** 正 会 員 博(工) 愛媛大学契約職員 工学部環境建設工学科

*** 正 会 員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

**** 愛媛大学技術専門職員 工学部環境建設工学科

***** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程

向上させるためである。本モデルは、候補分布を Gumbel 分布、形状母数が 0.5~10 の 27 種類の Weibull 分布および形状母数が 2.5~40 の 20 種類の FT-II 型分布の合計 48 種類とし、各資料への非超過確率の割当てを台田 (1990) のプロットング公式、最適分布の選択を最大相関係数基準、標準偏差の推定を jackknife 法による。

3. 燧灘における波高の極値

(1) 50 年確率波高と標準偏差

図-1 は 50 年確率波高 H_{50} とその標準偏差 $H_{\sigma 50}$ の空間分布を示す。図には、代表的な都市の名前を与えている。確率波高は、島や半島の遮蔽効果を受ける海域の東部や西部を除いて、燧灘中央部から四国沿岸海域で 3 m 程度、中国地方沿岸の沖合海域で 3.5~4 m の値をとり、おおむね愛媛県東予沿岸海域および香川県西部海域から岡山県および広島県沿岸の沖合海域に向けて N~NE 方向に増加する。しかし、波浪推算における地形解像度は 2 km であるので、多くの小島が存在する中国地方沿岸部の確率波高は過大評価となっている可能性を否定できない。また、標準偏差は燧灘中央部以北の海域では中央部の 0.15 m から中国地方沿岸沖合海域の 0.2 m に、以南

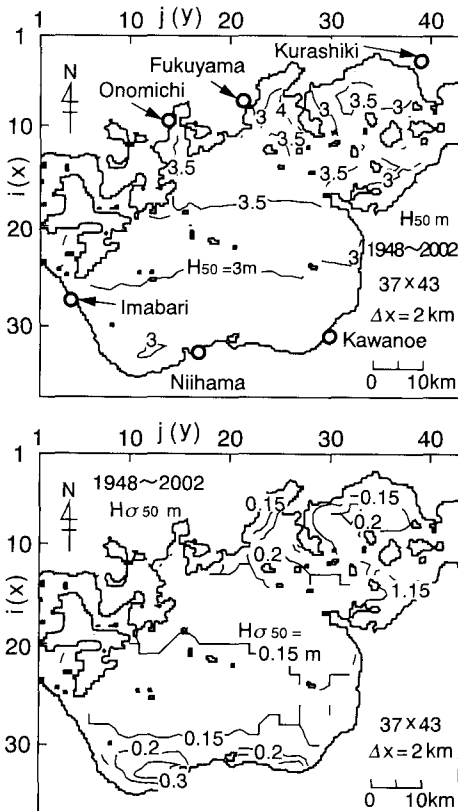


図-1 50 年確率波高とその標準偏差 (燧灘)

の海域では四国沿岸海域に向けて 0.15 m 弱から 0.2~0.3 m に増大する。変動係数は燧灘中央部海域で 4~5%，四国沿岸海域で 5~9%，中国地方沿岸の沖合海域で 4~6% の値をとる。なお、中国地方沿岸では水深の制約を受けて、波高、したがって確率波高とその標準偏差および変動係数がその沖合海域の値より小さい。

(2) 期間最大波高および台風 0310 号時最大波高

図-2 は以下に述べるように、燧灘および播磨灘の四国側海域に期間最大波高を生じた台風 6118 号 (第 2 室戸台風) および、ごく最近異常波高を生じた台風 0310 号の日本付近における 6 時間ごとの位置を示す。両台風とも、四国東部から淡路島近くを NNE~NE 方向に進行している。これらの経路はかなり類似するが、台風 6118 号の移動速度 (40~60 km/h) は台風 0310 号の移動速度 (25~30 km/h) より速く、台風 6118 号の中心気圧 (925~940 hPa) は台風 0310 号の中心気圧 (950~970 hPa) より低い。また、台風半径は台風 6118 号で約 100 km、台風 0310 号で 110~180 km である。以上の特性は台風 0310 号時と比べて台風 6118 号時に、風速がかなり大きい、強風の継続時間は短いことを示唆する。

図-3 は期間最大 (第 1 位) 波高 H_{max} とこれに付随する平均波向 (錯綜を避けるため、2 格子飛びに図示) の空間分布を示す。期間最大波高の特徴は燧灘の中央部海域で広範囲に 3 m をとり、そこから中国地方沿岸の沖合海域に向けて 4 m 前後に、四国沿岸海域に向けて 3.5 m に増加する点にある。すなわち、期間最大波高は、燧灘中央部より北側の海域では、50 年確率波高と同様に N~NE 方向に向けて増加し、50 年確率波高との差もおおむね 0.4 m 以下であるのに対して、灘中央部より南側の海域では S~SW 方向に増大し、しかも 50 年確率波高を最大 0.7 m 上まわる。また、平均波向は灘中央部より北側の海域で S~SW、南側の海域で N~NE を示す。これは、期間最大波高が灘中央部より北側の海域では中国地

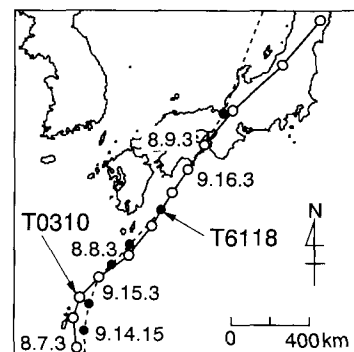


図-2 台風 6118 号と台風 0310 号の日本付近における経路

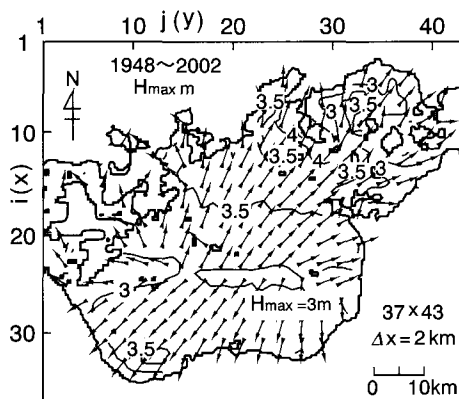


図-3 期間最大波高と平均波向（燧灘）

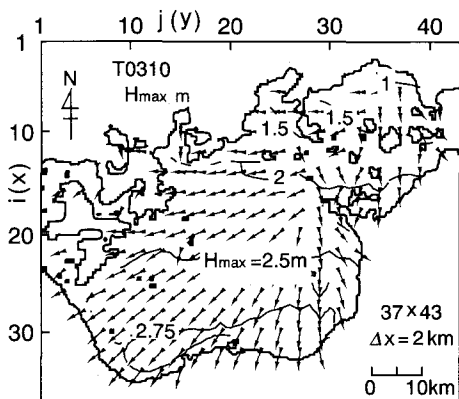


図-4 台風 0310 号時の最大波高と平均波向（燧灘）

方沖合の日本海を NE 方向に進行し、台風の右半円に当該海域を含めた台風 9119 号時に、南側の海域では当該海域を台風の左半円に含めた上記の台風 6118 号時に主として生起していることによる。燧灘のような狭い海域においても、異常波高をもたらす台風は海域ごとに異なる。

図-4 は台風 0310 号時の最大波高と平均波向の空間分布を表す。波高は岡山県沿岸の水島灘付近の 1 m から吹送距離の長い愛媛県東予沿岸の 2.75 m に向けて SW 方向に増加する。四国沿岸海域における波高は過去 55 年間の第 2 位波高に相当する。これは第 1 位波高と比べて 0.5~0.7 m 低い。一方、平均波向は遮蔽効果の小さい燧灘中央部以南で NE~NNE をとり、香川県西部海域では沿岸地形の影響によって、N あるいは NNW に傾く。

4. 播磨灘における波高の極値

(1) 50 年確率波高と標準偏差

図-5 は 50 年確率波高とその標準偏差の空間分布図であり、北西端より x 軸方向 34, y 軸方向 54 の領域を図の範囲とする。また図中には、代表的な都市、島、波浪

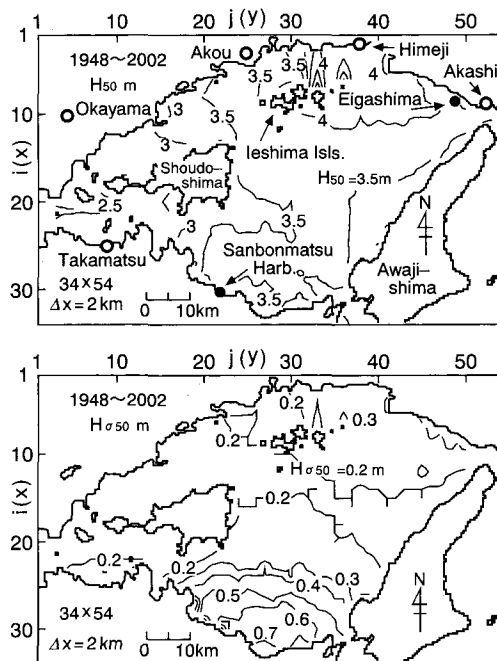


図-5 50 年確率波高と標準偏差（播磨灘）

観測地点（黒丸印）の名称を示す。確率波高は香川県沿岸海域から播磨灘中央部で 3.5 m よりやや大きい値、灘中央部より兵庫県沿岸海域で 4 m 強に達し、N~NE 方向に向けて若干増加する。また、小豆島の北側と南側の海域および家島諸島の北側海域では、それぞれ島による遮蔽効果が強く現れるため、その影響圏内の波高は低くなる。一方、標準偏差は灘中央部海域の 0.2 m から兵庫県沿岸海域の 0.3 m に、あるいは香川県沿岸海域の 0.7 m にそれぞれ増加する。小豆島の北側および南側海域あるいは家島諸島の北側海域では 0.2 m より小さい。変動係数は 4~19% の範囲にある。この値は、灘中央部から兵庫県沿岸海域では 6~7% をとり、NE 方向に若干大きくなる程度であるのに対して、灘中央部から香川県沿岸海域では SW から S 方向に向けて 6% から 19% に増加する。要するに、香川県の沖合海域では、変動係数がかなり大きい。また、小豆島の北側および南側海域では、W 方向に 6~7% からおおむね 4~5% に減少するが、香川県中部の沿岸海域では 10% を越える海域も見出される。

図-6 は兵庫県明石市近くの国土交通省江井ヶ島観測所（水深 10.5 m）で取得された 1972~2002 年の年最大波高資料に対する極値統計解析の結果を Q-Q プロットとして表す。31 年間の観測資料のうち、1976, 1977, 1981 年は欠測となっている。長期波浪推算資料や今回の台風時波高推算資料によれば、1976 年と 1977 年の年最大波高は 1 m 以下であるが、1981 年の年最大波高は 2 m を若

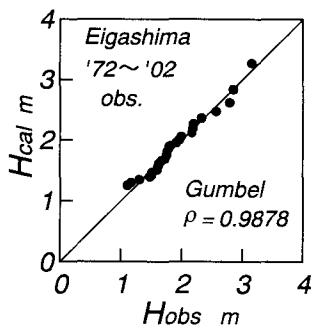


図-6 年最大波高資料に対するQ-Qプロット(江井ヶ島)

干越える。しかし、これらを考慮した極値統計解析によっても、確率波高の推定結果はほとんど差を生じない。さて、当該期間中の第1位から第5位までの年最大波高はすべて台風時に生起しており、第6位以下の年最大波高資料に初めて低気圧時波高が現れる。したがって、江井ヶ島では年最大波高資料に寄与する台風時波高の影響が圧倒的に大きいことから、台風時年最大波高資料に限定した解析を行っても今回と同様の確率波高の推定値が得られると推測される。解析によれば、最適分布はGumbel分布、相関係数は0.9878、50年確率波高とその標準偏差は 3.23 ± 0.28 mである。相関係数の値がやや低いけれども、個々の観測値と計算値の対応はかなり良好であり、DOL基準およびREC基準による棄却検定(合田, 1990)も最適分布を棄却しない。一方、江井ヶ島相当地点における推算資料の解析に基づく50年確率波高とその標準偏差は 3.53 ± 0.16 mであるから、観測資料に基づく結果に近い値を与える。また、推算資料による台風9313号時の最大波高3.21 mは観測資料における第1位波高である同台風時の3.15 mとよく符合する。

(2) 期間最大波高および台風0310号時最大波高

図-7は期間最大(第1位)波高と平均波向の空間分布を示す。期間最大波高は兵庫県の沖合海域で4~4.5 mをとるのに対して、香川県沿岸の沖合海域では4.5~5 m

弱に達し、兵庫県側より大きい。また、期間最大波高は灘中央部より北側の海域では50年確率波高より最大0.35 mの差をもつにすぎないが、南側の海域では最大1.3 m上まわる。それぞれの海域における期間最大波高を生起した主な台風は、北側の海域では広島県から鳥取県をNE方向に進行し、当該海域を台風右半円に含んだ台風5415号(洞爺丸台風)と台風9313号、南側の海域では当該海域を台風左半円に含んだ前述の台風6118号である。とくにNE方向の異常風速が吹送した台風6118号に伴う第1位波高は香川県側の海域で第2位波高に比べて2 m以上大きく突出する。この結果、極値統計解析において台風時年最大波高資料に対する最適分布の適合度は低くなっており、確率波高の標準偏差や変動係数の値も他の海域に比べて大きい。適合度の低下は、期間最大波高と50年確率波高の差が0.7 m以下である燧灘の南側海域における場合より増大する。因みに、播磨灘南側海域における期間最大波高、すなわち台風6118号時最大波高の再現期間は300年以上と推定される。これは台風6118号のような巨大台風に伴う異常波高の発生頻度がきわめて少ないことに起因する。期間最大波高の波向は灘中央部より北側の海域でS寄り(主として台風9313号時)、南側の海域でN寄り(台風6118号時)をとる。

図-8は台風0310号時の最大波高と平均波向の空間分布を示す。波高は兵庫県沿岸海域の1.5 mから香川県沿岸海域の3 mへWSW~SW方向に増加するが、平均波向は播磨灘をNE-SW方向に2分する西側の海域でE~NE寄り、東側の海域でW~NW寄りをとり、東西の海域でその特性を異にする。これは播磨灘全体で平均波向をN~NE方向とする台風6118号時最大波高の平均波向の分布特性(図省略、図-7参照)と大いに異なる。この原因は、両台風の経路が類似していても移動速度と台風半径が異なるため、最大波高生起時刻と最大風速生起時刻に差を生じることにあると推測される。また、台風0310号は香川県沿岸海域に過去55年の間の第2~第3位波高を生起している。

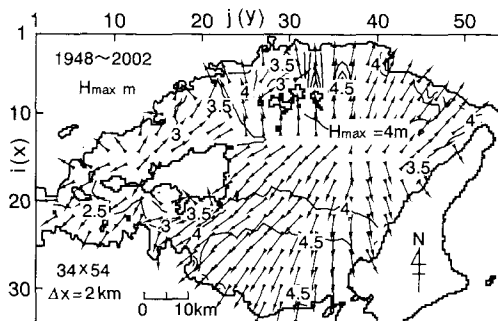


図-7 期間最大波高と平均波向(播磨灘)

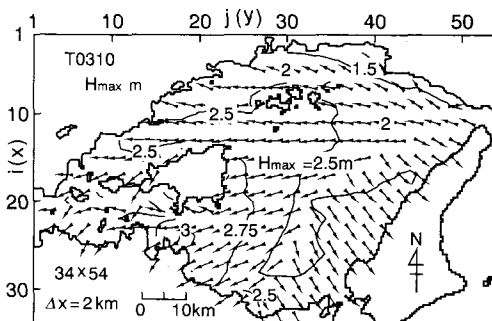


図-8 台風0310号時の最大波高と平均波向(播磨灘)

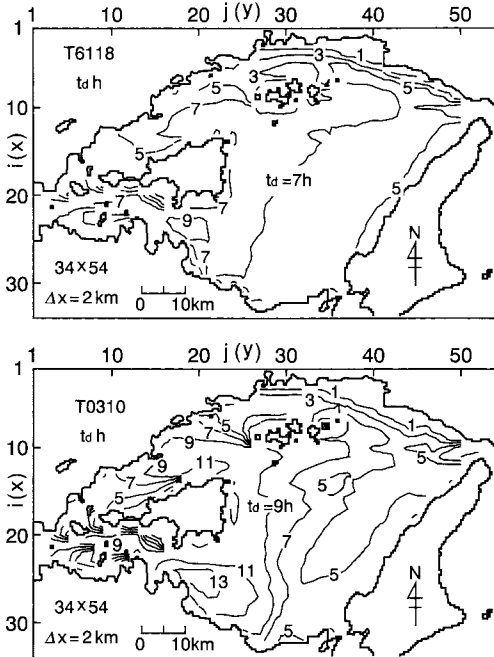


図-9 台風 6118 号時と台風 0310 号時の高波継続時間 (播磨灘)

図-9 は台風 6118 号時および台風 0310 号時における 2 m 以上の波高の継続時間 t_d に関する空間分布を表す。両台風時における高波継続時間の空間変化は類似しており、いずれも兵庫県東部の沖合海域から香川県中部の沖合海域に向けて WSW～SW 方向に増加する。絶対値で見れば、最長の高波継続時間は、5 m に近い異常波高を生じた台風 6118 号時には 9 時間、最大波高が最大 2.5 m 低い台風 0310 号時には 13 時間であり、香川県中部の沖合海域では後者の継続時間が最大 4～5 時間長い。要するに、台風 0310 号時の波高時系列は灘中央部より南側の海域で波高の絶対値に比べてかなり長い高波継続時間を持ち、とくに香川県中部の沖合海域でその特徴が著しい。これは、台風の移動速度や台風半径に関係して、台風 0310 号時に NE 方向の強風が長時間吹送したことによる。同様の挙動は燺灘中央部より南側の海域で見出される。

図-10 は台風 0310 号時の香川県三本松港 (水深 7 m) における観測波浪時系列と推算波浪時系列 (H : 波高, T : 周期) の比較を示す。推算値は観測値に比べて緩やかな変化を示すが、平均的に比較的良好に符合する。また、観測時系列にみられる著しい凹凸は、風波の発達期である 8 月 8 日 16 時から最盛期である 8 月 9 日 1 時にかけて波浪観測資料が信頼性を欠く (測定波数がかなり少ない) ことによると考えられる。江井ヶ島においても推算値と観測値の定性的対応は得られるけれども、推算波高は観測波高よりやや大きめの値を与える傾向にある。

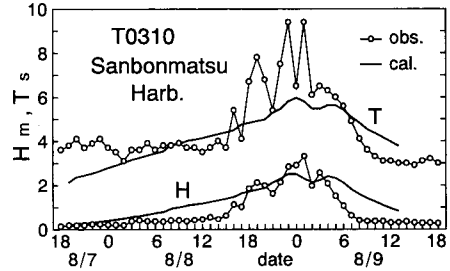


図-10 三本松港における波浪時系列の比較

5. 結 語

本研究では、過去 55 年間の多数ケースの台風を対象とした燺灘および播磨灘における浅海波浪推算から得た台風時年最大波高資料に対する極値統計解析に基づいて、両海域における 50 年確率波高と期間最大波高を推定し、その海域特性を明らかにした。また、台風 0310 号に対する同様の波浪推算資料に対する考察から、台風 0310 号時の最大波高は燺灘および播磨灘の四国沿岸海域に期間最大波高に継ぐ第 2～第 3 位の高波高に相当し、しかも高波の継続時間がきわめて長いことを示した。さらに、推算結果の妥当性は推算資料と観測資料に基づく確率波高の推定値が比較的近い値をとることや台風 0310 号時の観測波浪時系列と推算波浪時系列が比較的良好に符合することなどから、ある程度裏付けされた。

最後に、江井ヶ島観測所における波浪観測資料を提供戴いた国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所および海象年表を提供戴いた国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室ならびに台風 0310 号時の三本松港における波浪観測資料を提供戴いた香川県長尾土木事務所に謝意を表す。

参 考 文 献

- 合田良實 (1990): 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.
- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝 (2000): 拡張型確率的台風モデルを用いた波高の極値推定システム, 海岸工学論文集, 第 47 巻 (1), pp. 271-275.
- 光田 寧・藤井 健 (1997): 台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速との関係, 京大防災研年報, 第 40 号 B-1, pp. 165-172.
- 山口正隆・畑田佳男・細野幹司・日野幹雄 (1984): エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知モデルについて, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
- 山口正隆・西岡賢二・田中浩二 (1990): 構造物が存在する場合の不規則波に伴う海浜流の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 205-209.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen (1978): Energy loss and setup due to breaking of random waves, Proc. 16th ICCE, Vol.1, pp. 569-589.
- Yamaguchi, M. and Y. Hatada (1997): An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES 97, Vol. 2, pp. 932-946.