北西太平洋における台風発生50年確率波高の 長期的な変動の推定

畑田 佳男¹・白神 恭平²

¹正会員 愛媛大学講師 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: hatada.yoshio.mj@ehime-u.ac.jp

²愛媛大学工学部 環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: shirakami.kyohei.09@cee.ehime-u.ac.jp

台風モデル法で海上風を推定した1934～2013年の波浪推算結果から北西太平洋における50年確率波高 H_{50} の経年変化を調査した。このため80年間の推算結果の中に開始時点を10年ずつずらした30年(あるいは40年)の波高資料を6組(5組)作成し、各組の H_{50} の比較からつぎの結果を得た。1)統計期間を30年とした H_{50} は多くの地点で明瞭な増減傾向を示さない。2)期間を40年とした H_{50} も同様な経年変化を示すが、その変動は30年の場合より小さい。3) H_{50} の算出に用いた年最大波高のトレンド示数 I_T は九州西岸、北海道南方沖で増加傾向を示すものの、有意な増減を表わす2を越える地点は数地点に限られる。4)対象領域の H_{50} は過去80年間においては顕著な増加減少傾向を示さない。

Key Words :50-year return wave height, trend, a parametric typhoon model, 80-year wave hindcast, Northwestern Pacific Ocean

1. 緒言

気候変動に伴う波浪の将来長期的な変動は海岸構造物の設計において重要な要因の1つであり、気象モデルから得られた海上風を入力条件とした波浪推算を基に推定が行われている。しかしながら将来的な予測は平均波高に関するものが多く、工学的に関心の高い波高の極値についての知見は限られている。また予測は全球を対象にした場合が多いため、我が国周辺海域の様子が解りにくい。森らは波浪推算モデル¹⁾、や統計的モデル²⁾から極大波高の将来的な変化を推定しており、今世紀末にかけて北西太平洋における極大波高の増大が予測されている。

本研究では我が国周辺の北西太平洋における過去の波浪推算結果から、確率波高がどのような長期的変化傾向をもつのか、現時点で変化の兆候が表れていないのかを調査する。対象海域で問題となる高波は台風により発生すると考えられるので、簡便ではあるが長期間のデータが取得された台風モデルにより海上風を推定した波浪推算を行う。また50年確率波高 H_{50} の経年変化を知るため1934年～2013年(80年間)の波浪推算結果の中から統計期間30年(あるいは40年)の波高推算資料を10年ずつずらして6組(5組)作成し、各組に対して求めた確率波高を比較することから台風発生波高の再現確率値の長期的な変化を調べる。同時に確率波高の算出に用いた年最大波高の

経年変化をそのトレンド示数から検討する。

2. 確率波高の推定方法

(1) 波浪推算法

対象海域は図-1に示す我が国周辺の北西太平洋であり、海上風および波浪とも格子間隔80km(36×35)の空間解像度で計算を行った。図-1中の赤い点は図-11で H_{50} の経年変化を検討する地点である。波浪推算に用いた海上風は

図-1 波浪推算の計算格子

図-2 対象台風個数の経年変化

表-1 推算精度を検討した台風

No.	T.No.	No.	T.No.	No.	T.No.
1	1007	6	1112	11	1216
2	1014	7	1115	12	1217
3	1102	8	1204	13	1318
4	1106	9	1210	14	1324
5	1109	10	1215	15	1326

気圧分布にMyers式を仮定した台風モデル法により1時間間隔で推定する。波浪推算は山口らの波浪推算モデル³⁾で水深を無限大とした深海波浪推算モデルによる。実際の推算では計算時間間隔1時間で方向スペクトルを算出し、これから有義波高 H_s を求める。方向スペクトルの成分は0.047~1Hzの20個の周波数、0~360°を20°で分割した19方向である。以下の波高は有義波高 H_s である。

(2) 対象台風

確率波高の推定に用いた台風は1934年~2013年の80年間の590個である。これらのうち1951年以降については図-1の領域内で中心気圧が980hPa以下になった台風を対象とするが、これ以前については発達した巨大台風に限られる。図-2は対象台風個数の経年変化であり、1948年以降には毎年台風データがあるが1949年、1973年、1983年、1995年、2008年は5個未満と少なく、1947年以前には台風データの無い年もある。毎年台風データのある1948年~2013年における対象台風の年平均個数は8.7個程度である。

(3) 極値解析法

極値統計解析には、Gumbel分布、Weibull分布（形状母数 $k=0.5\sim10$ の27種類）、FT-II型分布（形状母数 $k=2.5\sim40$ の20種類）の計48種類を候補分布とし、標本資料に対する非超過確率値の割当てを合田のプロットング公式⁴⁾、尺度母数と位置母数の推定を最小2乗法、最適分布の選択を最大相関係数基準、再現確率値の標準偏差の推定をjackknife法によるYamaguchi・Hatada⁵⁾のモデルを用いる。また1947年以前の対象台風ケース数が少ないことおよび同期間の台風は巨大台風を中心に選択されていることを考慮して極値資料には資料採択率 ν を上位1/3に設定した年最大波高資料を用いた。

図-3 有義波高の経時変化の比較例

図-4 台風期間最大波高の相関

図-5 H_s の推算値と観測値のTaylor図

3. 推算精度の検討

波浪推算精度の検討は、格子間隔80kmと荒い計算であるため、日本沿岸で台風の影響を受ける沖合の波浪観測点で行う。このため高知県西部沖~御前崎沖に至るNOWPHASのGPSブイ5地点で2010年~2013年の15台風時の H_s の推算結果を観測結果と比較した。表-1は比較対象台風の一覧であり、比較ケース数を確保するために東シナ海を北上した台風1215号のように離れた経路をもつ台風を含んでいる。図-3は H_s の経時変化の比較例である。推算結果は発達期から減衰期に至る観測結果の経時変化に対応している。このケースは以下の図-4および図-5中に青色で示されている。図-4は各台風時の最大有義波高を推算結果と観測結果について比較した相関図である。図中、観測値あるいは推算値が10mを越える場合に赤く

図-6 推算精度の低い台風経路

着色するとともに相関の低いケースに台風番号を付記してある。台風1326号は本州南岸を台風1115号と1217号は観測地点の近傍を北東に進んだ台風であり、陸から風が吹送した場合や時空間変化の激しい場合に推算精度が低下している。全体として推算結果は観測結果より小さい傾向を有するものの高波高時には完全相関直線の上下に作図され、観測結果に対して特定の偏りをもたないといえる。図-5は台風毎に推算結果と観測結果の相関係数 ρ とそれぞれの標準偏差の比 $\sigma_{\text{cal}}/\sigma_{\text{obs}}$ を1点で描画したTaylor図⁹⁾である。Taylor図は半径方向に標準偏差比 $\sigma_{\text{cal}}/\sigma_{\text{obs}}$ 、動径方向に相関係数 ρ をとった図であり、青丸で表示した目標値(1, 0)に近い程、推算結果と観測結果の対応が良いと判定される。また図-4で着色した高波高ケースは図-5でも赤く着色されている。高波高ケースは目標値(1, 0)に近い位置にあるが、台風1217号時の尾鷲は目標値から遠い点に描画されている。図-6はTaylor図上で推算精度の低い($\sigma_{\text{cal}}/\sigma_{\text{obs}} > 2$)と判断された台風の経路図である。比較地点から遠い経路を通った台風あるいは複数の台風や低気圧が存在した場合に目標値(1, 0)から離れた位置に描画される。このように推算結果と観測結果の対応の低下する場合もあるが、図-3のようなケースでは相関図およびTaylor図とも推算精度が良好な位置に作図されること、推算結果は観測結果よりやや小さい傾向を有するものの、高波高時には観測結果に対して特定の偏りをもたないことなどから、 H_{50} の長期変動の推定に必要な精度をもつと判断した。

4. 確率波高の推定結果

(1) 確率波高 H_{50} の経年変化

まず1934年から2013年において開始時点をも10年ずつずらした30年間の年最大波高資料を6期間作成し、各期間の極値解析から求めた H_{50} の平面分布からその経年変化の概略を把握する。30年間における年最大波高資料

を重複させながら6期間作成し、各期間の H_{50} から経年変化を調査する方法に理論的な根拠は無いけれども、確率波高の推定には少なくとも30年程度必要であること、できるだけ多くの期間に対する H_{50} で経年変化を表示するという観点からこのような方法をとった。図-7は各30年間の対象台風経路を例示した図であり、上側に期間と台風個数(括弧内)を表す。1964年以降の経路図は台風個数が275個前後をとって1954年～の期間と大差なく、分布パターンも同様であるので、1964年以降の各30年については1984年～の期間のみ示されている。最初の2期間は残りの期間に比べて台風個数が少なく、経路図の分布密度も低い。図-8は1934年および1944年から始まる30年間より求めた2期間の H_{50} を、図-9は残りの4期間の H_{50} を左側ほど過去になるように配置した平面分布図である。 H_{50} は図-8および図-9の1954年～の期間において領域の東端付近で17mを越えるが、これらの期間と南端境界付近の一部を除けば本州南方で14～16m程度の値をとる。

図-7 各30年間の台風経路

図-8 各30年間の H_{50}

図-9 1954年から開始年を10年ずつずらした各30年間の H_{50}

図-10 1944年から開始年を10年ずつずらした各40年間の H_{50}

1964年以降に設定した後半の3期間では年代につれて若干小さくなるものの類似した平面分布を示す。図-10は統計期間を40年とした H_{50} を図-9と同様に表している。1934年～の期間は1944年～の平面分布に似ているため省かれている。また期間40年に対応する台風経路図も掲載されていないが、各期間の台風個数が30年の場合より80個ほど増えて経路が稠密になるため年代による変化が識別し難い図となる。図-10によれば40年間に對して求め

た H_{50} も本州南方で14～16m程度をとり30年間に對して求めた H_{50} と同様な平面分布を示すが、期間による変化は30年間の場合より小さい。図-8～図-10より H_{50} は期間30年の場合に台風数の少ない1934年～1954年で他期間より大きい結果、弱い減少傾向を有するように見えるが、期間を40年とすれば台風数の変化による影響が弱まって緩やかな経年変化になり、領域全体で顕著な経年的変化を示さないように見える。

図-11 30年間（上段）および40年間（下段）について求めた H_{50} の経年変化

図-11は図-1に赤色で示した18地点における H_{50} の経年変化を示した図であり、上段が30年間、下段が40年間から作成された H_{50} である。各段は右側が東側になるように配置した4枚の小図からなり、各小図内では北に向かって赤、黒、青（ $j=22$ と $j=30$ のみ青色の $i=20$ 地点が追加されている）、同色では北側の地点が点線で表示されている。作図地点の間隔は南北方向320km、東西方向640kmで、全18地点で大略南北1200km、東西1800kmほどの領域（先島諸島から小笠原諸島付近の本州南岸）における H_{50} の経年変化を例示している。なお $j=14$ の地点では $i=20$ が陸地のため1格子南側の地点を用いる。 H_{50} は $j=6$ と $j=14$ で南側ほど大きい傾向を示すが、残りの地点では系統的な空間変化を示さず、11m～16mの範囲をとる。 H_{50} の経年変化は弱い減少傾向にある地点が多いものの地点毎に異なる変化を示し、全地点に共通した強い増加あるいは減少傾向をもたないようである。また H_{50} の経年的な変動は40年間から求めた結果が30年間から求めた場合より小さいけれども両者の変化傾向に大きな違いはない。したがって本州南方沖において H_{50} は顕著な経年変化を示さないといえる。

(2) 年最大波高の経年変化

ここでは確率波高の算出に用いた推算年最大波高の経年変化について述べる。図-12は80年間のうち台風データの有る年が連続した1948年から2013年(66年間)の年最大波高の時系列資料から求めたトレンド示数 I_T の平面分布である。 I_T は時系列データのある値に対して、これ

以降にある値以上の値が現れる回数に着目してトレンドを判断する示数である。 I_T が正であれば増加傾向、負であれば減少傾向を示し、その絶対値が2を越えれば有意な変化とする指標である。対象領域では九州西岸や北海道南方沖で増加傾向が、南方沖で減少傾向が表れている。 I_T の絶対値が2を越える領域は図中に格子番号を示した地点に限られ、その値は-2.14 (32, 13), 2.03 (25, 10), 2.05 (5, 30)である。したがって年最大波高は対象領域において顕著な変化傾向を示さないと考えられる。図-13は図-12において I_T の小さい地点(32, 13), と大きい地点(25, 10), (5, 30)における年最大波高の経年変化図である。九州南方沖の(32, 13)では1950年～1960年に高波高が出現した後、次第に減少している。沖縄北方の(25, 10)では1960年代に穏やかで1990年頃に高波が続く経年変化を示すが、強い増加傾向を持つ印象はない。北海道南方沖の(5, 30)では1980年から2000年にかけて高波高が連続するため弱い増加傾向にあるように見える。これらから $I_T > 2$ となる地点においても2.05程度であれば年最大波高は強い増加傾向を示さないといえる。図-14は図-13に示した3地点について40年間（左側）および30年間（右側）から求めた H_{50} とその標準偏差の範囲を表している。 H_{50} は(32, 13)で減少傾向、(25, 10)と(5, 30)で弱い増加傾向を示し、年最大波高の I_T の大小に対応した増減を示す。年最大波高の I_T において経年変化が有意と判定されても、その値が2.1を越えなければ H_{50} の変化傾向は明瞭でない。図-15は $|I_T| > 2$ となる地点と残りの地点の相関係数を年最大波高の経年値について示した図である。左側は減少傾向のあつ

図-12 年最大 H_5 のトレンド示数

図-14 $|I_T| > 2$ となる地点における H_{50} の経年変化

図-13 $|I_T| > 2$ となる地点における年最大波高の経年変化

図-15 $|I_T| > 2$ となる地点と他地点の年最大波高の相関

た(32, 13), 右側は増加傾向にあった(25, 10)地点の相関係数を表している. 等値線は(32, 13)で円形に近く, (25, 10)では台風経路の卓越方向に近い北北東に伸びる楕円形を示す. また相関係数が0.8より大きい格子点数は(32, 13)で8個, (25, 10)で6個であることから, 年最大波高の経年変化の似た地点は周辺に限られている. したがって H_T の値から有意な変化傾向があると判定された地点があったとしても似た経年変化を示す範囲は狭いと考えられる.

5. 結語

以上, 四国沖から御前崎沖のGPSブイで台風時における推算波高と観測波高の比較から推算精度を確かめたのち, 北西太平洋における1934年~2013年の台風時波浪推算から得た50年確率波高について経年変化を検討した. 得られた結果は以下のようである.

- 1) 1934年~2013年に10年ずつずらして作成した6期間各30年間に對して推定した50年確率波高は弱い減少傾向を有する場合もあるが, 北西太平洋全体で見れば顕著な増減を示さない.
- 2) 5期間40年間の50年確率波高も30年間を対象とした場合と似た経年変化を示すが, その変動は30年間の場合より小さい.
- 3) 連続した年最大波高の得られる1948年~2013年に対して推定したトレンド指数の平面分布によれば, 九州西岸, 北海道南方沖に弱い増加傾向がみられるものの, 2を越える地点は数地点に限られる.

以上より, 北西太平洋における台風に起因する年最大波高とこれから求まる50年確率波高は, 対象とした過去

80年間に限れば系統的な増加・減少傾向を示さないといえる.

謝辞: 推算精度の検証に使用したGPS波浪計のデータは, 国土交通省港湾局によって観測され, 港湾空港技術研究所で処理されたものであり, ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 森 信人, 志村智也, 安田誠宏, 間瀬 肇: 地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 1231-1235, 2010.
- 2) 森 信人, 岸本理紗子, 志村智也, 安田誠宏, 間瀬 肇: 全球の統計的波高推定手法の開発と将来変化予測への応用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.1_1501-1_1506, 2015.
- 3) 山口正隆, 畑田佳男, 細野浩司, 日野幹雄: 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, 1984.
- 4) 合田良実: 耐波工学, 鹿島出版会, 430p., 2008.
- 5) 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.
- 6) Taylor, K. : Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *J. Geophys. Res.*, Vol.106,No.D7, pp.7183-7192, 2001.
- 7) 鈴木栄一: 気象統計学(第 5 版), 地人書館, 314p., 1975.

(2016.3.16 受付)

ESTIMATION OF LONG TERM VARIABILITY OF TYPHOON GENERATED 50-YEAR RETURN WAVE HEIGHT IN THE NORTHWESTERN PACIFIC OCEAN

Yoshio HATADA and Kyohei SHIRAKAMI

Variability in long periods of typhoon generated 50-year return wave height H_{50} in the Northwestern Pacific Ocean was estimated by wave hindcasts. The wave hindcasts are conducted from a period of 80 years using a parametric typhoon wind and wave prediction model in deep water. To estimate the variability of return wave height, H_{50} was estimated for each of six 30-year sets of annual maximum wave height data obtained between 1934 and 2013, with a 10-year forward shift for the beginning of each data set. Five sets of annual maximum wave height data from periods of 40 years were also used to compare with the H_{50} for the 30-year period data. Trend indices of annual maximum wave heights are estimated over a 65-year period when the annual values are obtained continuously. Main results are as follows: 1) H_{50} obtained from the 30-year periods shows no remarkable yearly increase or decrease over the large area. H_{50} obtained from the 40-year periods shows the same trend with less yearly change than that of the 30-year periods. 2) Trend indices of annual maximum wave heights show that no significant increase or decrease is detected in the area. 3) As far as the last 80 years is concerned, H_{50} shows no remarkable increase or decrease in the Northwestern Pacific Ocean.