

韓国沿岸における風速および波高の 傾向変動の推定

ESTIMATION OF TRENDS OF WIND SPEED AND WAVE HEIGHT ON THE COASTS OF KOREA

畑田佳男¹・山口正隆²・大福 学³・野中浩一⁴

Yoshio HATADA, Masataka YAMAGUCHI, Manabu OHFUKU and Hirokazu NONAKA

¹正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3 番)

²正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

³愛媛大学技術専門職員 工学部環境建設工学科

⁴正会員 博士(工学) 愛媛大学科学研究支援者 工学部環境建設工学科

A long-term wave hindcast system is applied location by location at 15 points on the coasts of Korea. The system operates a shallow water wave model based on backward ray tracing on a nested grid with high space resolution of 0.5 km under the input conditions of 51-year NCEP surface wind data. Comparison of measurements and hindcasts over one year at 6 stations reveals that the system reproduces well the time variations and climatic statistics of wave height and direction. Linear trend analyses are conducted using either of yearly-averaged data sets of wind speed and wave height at 9 points. One of the important findings is that the wave height climate on the coasts of Korea indicates a tendency of slight decrease or no trend over recent 41-year period.

Key Words : long-term wave hindcast, NCEP wind data, shallow water waves, wind speed, wave height, trend analysis, coasts of Korea

1. 緒 言

沿岸域における波浪の長期変動, とくに波高の経年的増加傾向は沿岸構造物の安全性を脅かし, 波浪災害の可能性を高めることから, その解明が重大な関心事となっている。最近, 欧米諸国では, Günther et al.¹⁾ や Cox and Swail²⁾ が40年間にわたる風資料を入力条件とする推算波浪資料の解析に基づいて, 北西大西洋や全球規模における波高の傾向変動を検討し, その実態を明らかにしつつある。しかし, 波浪推算における計算格子網の地形解像度が低いために, 得られる波浪資料は深海波浪であり, 沿岸波浪の特性を必ずしも代表しない。これに対して, 山口ら³⁾ および畑田ら^{4), 5)} は, 1948~1998年の51年間のアメリカ合衆国NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research: 国立環境予測センター/国立大気研究センター) による10 m高度表面風再解析値資料(NCEP風資料と云う)を入力条件として, 高地形解像度格子網のもとでの波浪推算に1点浅海モデル⁶⁾ を用いる,

「波浪の長期推算システム」を開発し, わが国の周辺海域や沿岸における観測資料との比較から, その適用性と波高の傾向変動の実態を明らかにしてきた。沿岸波浪の長期推算に基づく波高の傾向変動の解析は世界的にみても著者ら^{3)~5)} の検討事例にほぼ限られている。

最も近い隣国の韓国においても, 沿岸および沖合における本格的な波浪観測や20年間に及ぶ東シナ海・日本海における波浪推算が行われているが, 波高の傾向変動を検討する段階に至っていない。韓国の西岸は東シナ海に, 東岸は日本海に面していることから, たとえば冬季風時の卓越風向に対する沿岸部の方向がわが国の東シナ海沿岸部や日本海沿岸部の方向と異なる。したがって, そこでの波浪も日本沿岸の波浪と相違すると推測される。

そこで本研究では, 51年間のNCEP風資料を入力条件とする山口ら³⁾ の「波浪の長期推算システム」を利用して, 韓国沿岸における風速および波高の傾向変動を検討しようとするものである。すなわち, まず韓国沿岸に配置された6箇所の波浪観測地点において, 1998年1年間の推算波浪資料と観測資料の比較から, 本システムの精度を検証する。ついで, 韓国沿岸全域に配置した9箇所

の水深50 m地点における51年間のNCEP風資料および推算波浪資料を用いて、韓国沿岸における風速および波高の傾向変動を検討する。

2. 波浪の長期推算システムと資料解析法

(1) 海上風資料

本研究で使用するNCEP風資料は、1948年1月1日0時(UTC)～1998年12月31日18時の51年間に於いて全球を 192×94 に分割したガウス座標格子網上で6時間ごとに得られている。空間解像度は東西方向 1.875° 、南北方向約 1.9° であり、南北方向に不等間隔になっている。波浪推算に使用するNCEP風資料は、北西太平洋領域に設けた格子間隔80 km、大きさ 45×45 の直交格子網上格子点の緯度・経度座標を、直交座標と緯度・経度座標の変換数値表を用いて補間したのち、各格子点位置における風速成分を緯度・経度座標表示のNCEP風速成分に対する2次元4点補間式の適用によって推定する。

NCEP風資料は、陸地地形の影響を過度に受けるため、とくに朝鮮海峡・対馬海峡が位置する海域では、現実の風速より小さい風速を与える。この結果、たとえば(旧)運輸省玄界灘波浪観測地点では推算波高が観測波高より低く評価される。そこで、日本海西南部沿岸の波浪観測地点における波高資料との相関が向上するように、海峡中央部の1.25を中心としてNE-SW方向のそれぞれ約200 kmの範囲で1.0に線形的に減少する係数を乗じることにより、風速を増加させる。こうした方法に対する理論的根拠はないけれども、現時点では推算波高と観測波高の対応を向上させるためにやむを得ない調整である。将来的には地域気象モデルなどの適用によって局所地形の影響を受けた風場をより適確に評価する必要がある。

(2) 波浪推算モデルと波浪推算条件

1点浅海モデル⁶⁾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・減衰および伝播を計算し、これによって1地点における波浪の経時変化を追跡する方法である。このモデルは、風波の発達に支配的役割を果たすとされる成分波間の非線形相互作用のモデル化に着目した波浪推算モデルの分類によれば、第1世代に属する。しかし、有義波レベルでの精度⁷⁾は、外洋波浪に対して第3世代モデルのWAMと比べて遜色ないし、また沿岸波浪に対しては、高地形解像度計算が容易でないWAMより高い。

韓国沿岸地点の波浪推算において使用する格子網は、図-1に示すように、およそ北緯 $20 \sim 43^\circ$ 、東経 $120 \sim 152^\circ$ (南北3360 km、東西3360 km)の東シナ海を含む北西太平洋上に設けた格子間隔5 km、格子分割数 673×673 の大領域格子網に、波浪推算地点周辺領域を格子間隔0.5 kmで分割した小領域格子網を組み込んだ高地形解像

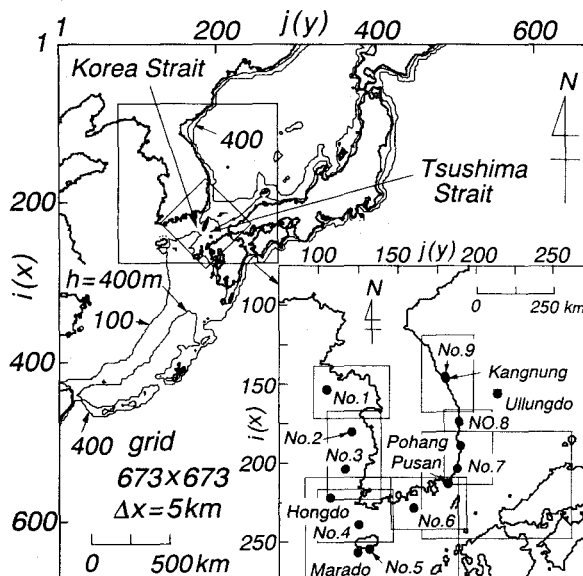


図-1 大領域水深格子網および波浪推算地点の位置

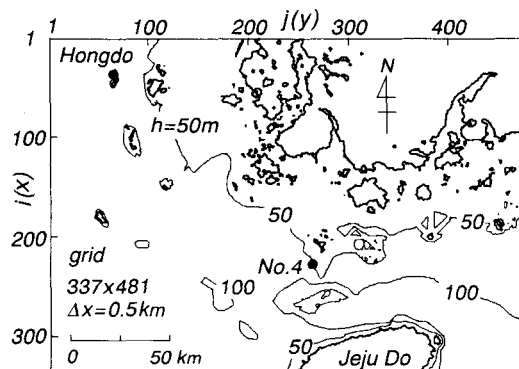


図-2 小領域水深格子網の1例および波浪推算地点の位置

度2段階水深格子網である。図-1には、風速の増幅を行った海域の範囲および韓国沿岸の拡大図も与えられる。拡大図は波浪推算地点の位置と各小領域の範囲を含む。図-2は小領域のうちの1例を示す。

波浪推算では、まず6時間ごとのNCEP風資料を線形補間することによって、格子間隔80 kmの格子点上の海上風成分を1時間ごとに算出する。ついで、これらを各成分波に対する波向線上に沿って設けた格子点上に2次元4点補間することによって、1時間ごとの海上風成分を求める。計算に使用する周波数データの個数は周波数区間 $0.04 \sim 0.50$ Hzを不等分割した23個、方向データの個数は全平面を方向幅 $\Delta\theta = 10^\circ$ で等分割した37個である。

波浪推算地点は、図-1に示すように、韓国沿岸に配置されたHongdo(紅島、水深40 m)、Marado(馬羅島、110 m)、Pusan(釜山、70 m)、Pohang(浦項、30 m)、Ullungdo(ウルルン島、50 m)およびKangnung(江陵、15 m)の6波浪観測地点と、韓国沿岸全域をほぼ包含するように任意に選択した、水深50 mの等深線上に位置するNo.1からNo.9の9地点である。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. 観測資料は1998年の1年間のうち数ヶ月間しか得られていない地点が多い. そこで, 推算資料と観測資料の詳細な比較は, 測得期間が比較的長く, しかも韓国西岸と東岸をそれぞれ代表する沿岸域に位置するHongdoおよびPohangの2地点に限定する.

(3) 波浪時系列資料の解析法

波浪要素として, 有義波高 H_s (波高) と平均波向 θ (波向) を取り上げる. そして, 年別に波高の平均値 $\bar{H}_s$ と標準偏差 σ_{H_s} および波高2m以上の高波出現率 p_H , さらに年別有義波高資料のうちの上位1/10個および上位1/3個の平均値 H_{s10} , H_{s3} (それぞれ1/10最大有義波高, 1/3最大有義波高に相当し, ここでは1/10最大波高, 1/3最大波高と云う) を求める. 1/10最大波高 H_{s10} および1/3最大波高 H_{s3} は波高資料における高波高部の特性を検討するために使用する. また, 推算波浪資料の精度を検討するため, 1998年1年間に對する推算波高資料と観測波高資料との間の相関係数 ρ_H および推算資料と観測資料との差の2乗平均平方根値 (2乗平均波高誤差) σ_H を, 波高誤差統計量の指標とする. 平均波向資料は2m以上の波高の波向別出現率の形で整理する.

ついで, 波高の傾向変動を調べるために, 年別の1/10最大波高 H_{s10} , 1/3最大波高 H_{s3} および平均波高 $\bar{H}_s$ の各時系列資料に1次式をあてはめたのち, t 分布の理論に基づいて, この勾配値 a が0という仮説が成立するか否かの片側検定を有意水準5%で行う. 勾配値 a が0という仮説が成立する場合に棄却検定指標を $L=0$, 成立しない場合で正の勾配をもつときに $L=1$, 負の勾配をもつときに $L=-1$ としてパラメータ表示する. また, トレンド示数 I_T による判別⁸⁾ も行う. 約20個以上の時系列資料に對して, ほぼ有意水準5%で時系列は, $I_T > 1.65$ の場合に増加傾向を, $I_T < -1.65$ の場合に減少傾向をもち, $|I_T| \leq 1.65$ の場合に傾向変動をもたないと判定する. なお, 風速資料についても同様の解析を行う.

3. 観測波浪資料との比較

(1) 代表地点における比較

Hongdo地点は韓国西岸南部の沖合約70 kmのHongdo (紅島) 北端からNW方向に数km離れた位置にある. 方向別対岸距離はN方向からW方向を経てSSW~Sの中間方向で500 kmを越えるのに対して, Hongdo (紅島) により遮蔽されるENE~S方向では数km以内である. 一方, Pohang地点は韓国東岸中部に位置し, 対岸距離はN~E方向で500 kmを超える. 図-3は3時間ごとの観測波高 $H_{s,obs}$ と推算波高 $H_{s,cal}$ との相関関係および相関出現率の等値線を両地点について示す. 各資料はPohang地点の高波高時を除いて, 完全相関を表す45°の直線のまわりには

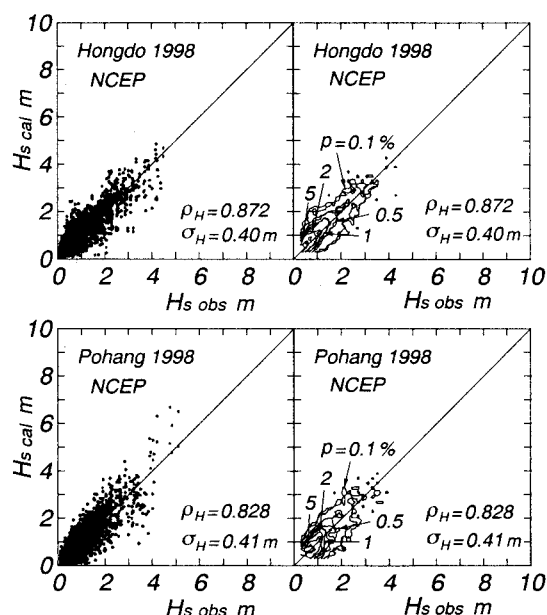


図-3 推算波高と観測波高の比較

ば集まることから, 全体としては推算波高の精度は比較的高いと云える. 詳しくみると, Hongdo地点では, 推算波高は波高が小さい場合に観測波高よりもやや大きく, 波高の増加とともに観測波高に近づく傾向にある. 一方, Pohang地点では推算波高はとくに高波高時に観測波高より大きい値を与える. 両地点において, 相関係数 ρ_H および2乗平均波高誤差 σ_H は, それぞれ (0.872, 0.40 m) および (0.828, 0.41 m) であるから, 波高誤差統計量は平均的にみて推算波高の精度がとくにHongdo地点において高いことを表す.

図-4は波高に関する月別波候統計量 (月別波高統計量) の比較を示し, 各図の下側には月別測得率 r を与えている. いずれの地点でも推算波高は観測波高と全般的によく符合する. しかし, Hongdo地点では5月, 10月における1/10最大波高 H_{s10} や3月, 5月における1/3最大波高 H_{s3} のように, やや隔たりを生じる月もある. これは各月の1~2ケースのストーム時に推算波高が観測波高に比べて過小あるいは過大な値を与えるためであり, 風資料の精度の不足に起因する. 同様の傾向はPohang地点においても見出される.

図-5は2m以上の波高の波向別出現率の比較を表す. 推算資料は, Hongdo地点ではNNW方向を卓越波向としてN~NW方向で高い出現率を示す観測資料とよく対応する. 同様に, Pohang地点では, 推算資料におけるENE方向の出現率が観測資料における出現率より大きい点を除けば, 推算資料はNE方向を卓越波向としてNNE~ENE方向に分布する観測資料と比較的よく符合する.

(2) 全波浪観測地点における比較

図-6は推算波高資料および観測波高資料より得た各波高統計量と波高誤差統計量を6波浪観測地点について図

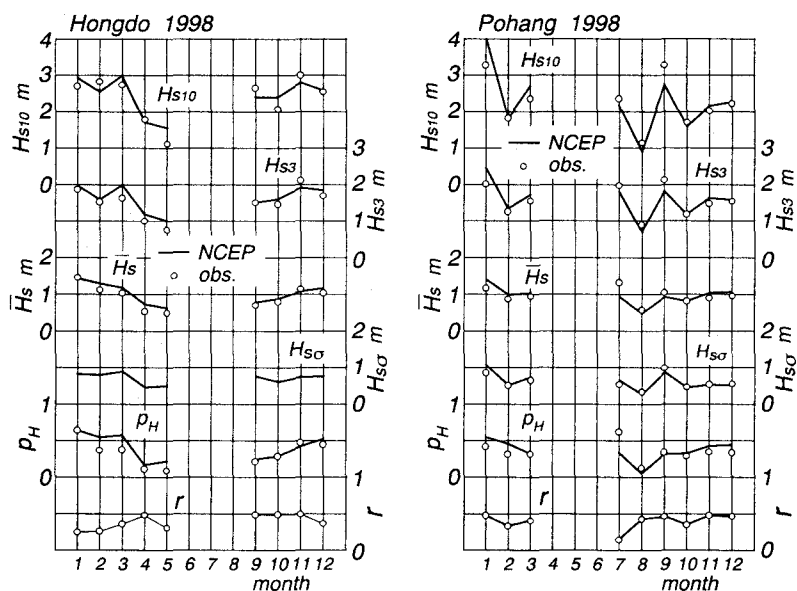


図-4 月別波高統計量の比較

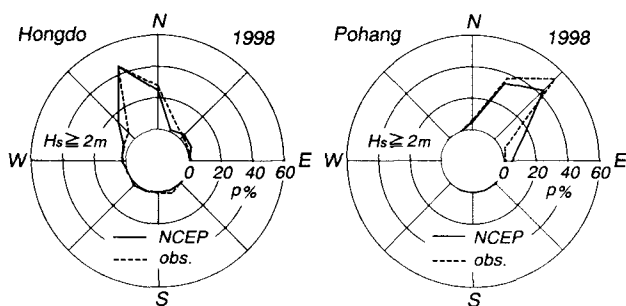


図-5 2m以上の波高の波向別出現率の比較

示したものである。年測得率 r は0.925をとるKangnung地点を除いて、Ullungdo地点で0.219、Pusan地点で0.386と低く、他の3地点でも0.554～0.592の範囲にある。したがって、年測得率はKangnung地点を除いて高いとは云えない。波高統計量を見ると、推算資料は全体的に観測資料と比較的よく符合し、各波浪観測地点間の波高統計量の差をおおむね再現する。しかし、とくに1/10最大波高に対して、推算資料はMarado、KangnungおよびUllungdoの各地点で観測資料より大きい値を与える。一方、波高誤差統計量をみれば、相関係数 ρ_H は0.746～0.872、2乗平均波高誤差 σ_H は0.29～0.44 mである。これらの数値は、推算波高の精度が多くの地点で比較的高いことを示唆する。

4. 韓国沿岸における風速と波高の傾向変動

NCEP風資料および推算波浪資料の期間は1948～1998年の51年間に及ぶので、これらの資料を用いることにより、風速および波高の傾向変動の検討が可能になる。傾向変動解析の対象とする年別統計量は1/10最大風速 U_{N10} 、

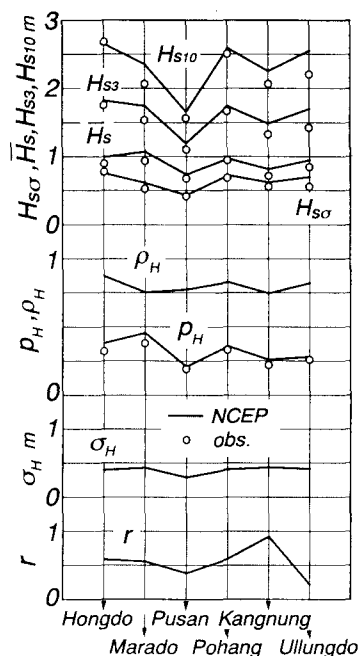


図-6 6観測地点における年別波高統計量の比較

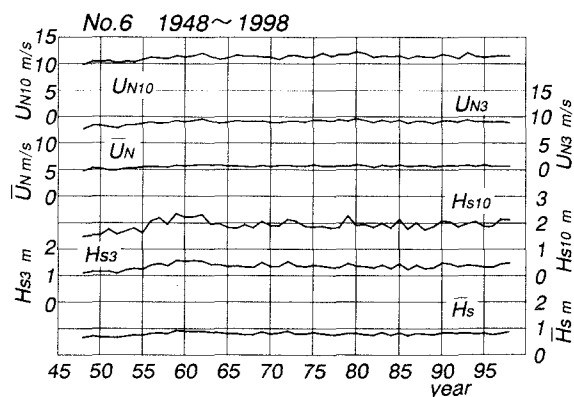


図-7 年別風速・波高統計量の経年変化

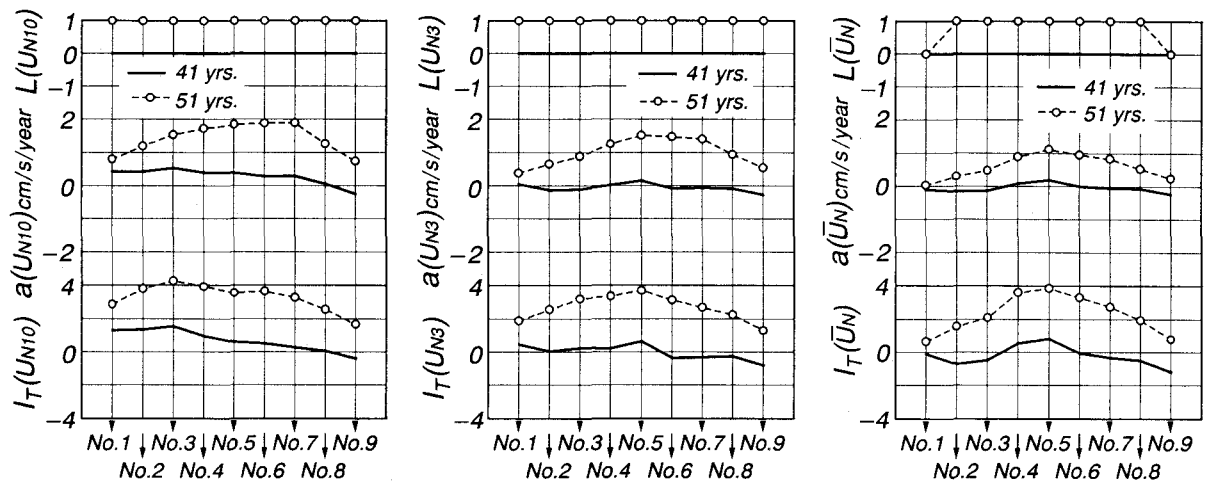


図-8 年別風速統計量に対する傾向変動の解析結果

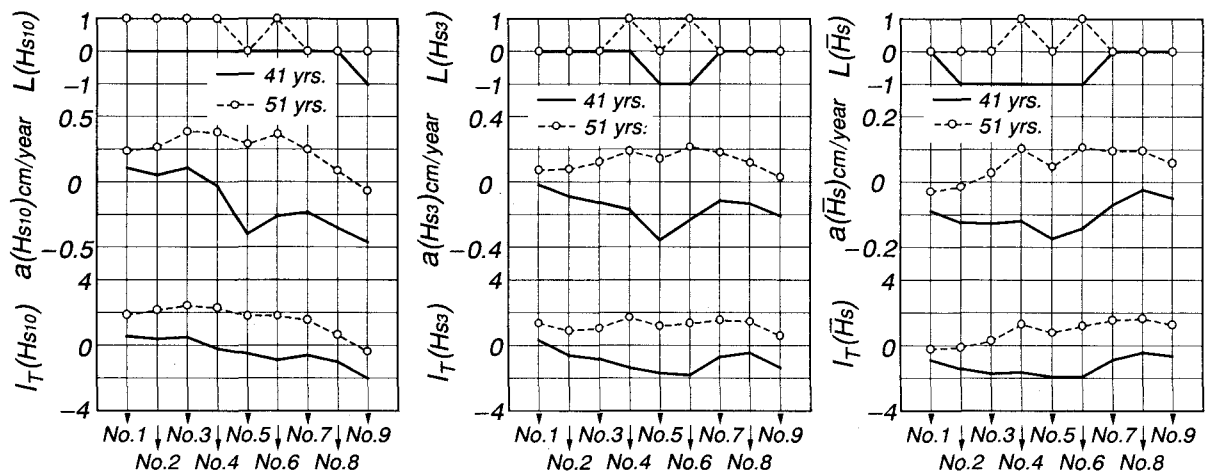


図-9 年別波高統計量に対する傾向変動の解析結果

1/3最大風速 U_{N3} および平均風速 $\bar{U}_N$ と、1/10最大波高 H_{s10} 、1/3最大波高 H_{s3} および平均波高 $\bar{H}_s$ である。図-7は51年間の風速・波高統計量の経年変化をNo. 6地点について例示したものである。年別風速・波高統計量は1948～1957年の10年間で増加傾向をもち、その後ほぼ一定値をとる傾向にある。この傾向は観測資料の不足や1958年を境とする観測方法および観測時間の変更などに伴うNCEP風資料の質的变化を反映すると推測される。同様の特徴はいずれの地点においても見出される。そこで、ここでは1948～1998年の51年間資料、およびNCEP風資料の等質性がほぼ確保されているとみなされる1958～1998年の41年間資料を用いて、年別風速・波高統計量に対する傾向変動解析を行い、それらの特性を検討する。

図-8は韓国沿岸9地点における年別の1/10最大風速 U_{N10} 、1/3最大風速 U_{N3} および平均風速 $\bar{U}_N$ の各資料に対する傾向変動の解析結果を沿岸方向に図示したものである。傾向変動を表す指標として、棄却検定指標 $L(U_{N10})$ 、 $L(U_{N3})$ 、 $L(\bar{U}_N)$ 、勾配値 $a(U_{N10})$ 、 $a(U_{N3})$ 、 $a(\bar{U}_N)$ およびトレンド示数 $I_T(U_{N10})$ 、 $I_T(U_{N3})$ 、 $I_T(\bar{U}_N)$ の3組をそれぞれ図に与えている。51年間の年別風速統計量は平均風速 $\bar{U}_N$ に

対するNo. 1地点とNo. 9地点を除いて、いずれも $L=1$ 、 $I_T > 1.65$ をとるので、各風速統計量は統計的に有意な経年的増加傾向を示し、その傾向はNo. 4～No. 6地点が位置する韓国南岸で強い。51年間資料より得られる風速統計量の経年的増加傾向は図-7でみたように、1948～1957年の10年間の増加傾向を反映することから、NCEP風資料の等質性に起因すると考えられる。一方、41年間資料ではいずれの風速統計量も $L=0$ 、 $|I_T| < 1.65$ をとることから、統計的に有意な傾向変動を与えない。

図-9は年別の各波高統計量資料に対する棄却検定指標 L 、勾配値 a およびトレンド示数 I_T を9地点についてそれぞれ示したものであり、たとえば、1/10最大波高 H_{s10} に対して各指標は $L(H_{s10})$ 、 $a(H_{s10})$ 、 $I_T(H_{s10})$ と標記している。1/3最大波高 H_{s3} および平均波高 $\bar{H}_s$ に対しても同様である。棄却検定指標 L をみると、51年間資料では、1/10最大波高は西岸のNo. 1～No. 3地点と南岸のNo. 4地点およびNo. 6地点で $L(H_{s10})=1$ をとり、有意な増加傾向を与えるけれども、それ以外の地点では $L(H_{s10})=0$ となり、傾向変動を示さない。また、1/3最大波高および平均波高の各年別資料は、 $L(H_{s3})=1$ 、 $L(\bar{H}_s)=1$ をと

るNo. 4とNo. 6の2地点を除いて、 $L(H_{s0}) = 0$ 、 $L(\bar{H}_s) = 0$ を与え、統計的に有意な傾向変動を示さない。このように、波高統計量の種類によって傾向変動に対する判別結果は必ずしも一貫しないけれども、各波高統計量に対するトレンド示数 I_T の値は最大でも2.0を若干上まわるに過ぎないので、統計的に有意な傾向変動をもつと判定される地点でも、波高の経年的増加傾向は弱い。

41年間資料では、年別波高統計量は1/10最大波高に対するNo. 1～No. 3地点を除いて、負の勾配値をもち、全体的に減少傾向を示す。棄却検定指標 L でみれば、1/10最大波高に対してNo. 9地点で $L(H_{s10}) = -1$ 、1/3最大波高に対してNo. 5とNo. 6の2地点で $L(H_{s3}) = -1$ 、平均波高に対してNo. 2～No. 6の5地点で $L(\bar{H}_s) = -1$ である。したがって、これらの地点における各波高統計量は統計的に有意な負の傾向変動を示すが、これら以外の地点では有意な傾向変動を与えない。また、1/10最大波高、1/3最大波高、平均波高に対するトレンド示数 $I_T(H_{s10})$ 、 $I_T(H_{s3})$ および $I_T(\bar{H}_s)$ はそれぞれ-2.0～0.3の範囲にあるので、統計的に有意な減少傾向も弱い。

結論として、統計的有意性を考慮すれば、1948～1998年の51年間では、韓国沿岸の風速は増加傾向をもつものに対して、波高は傾向変動を伴わないか、あるいは増加傾向にあり、少なくとも減少傾向にない。一方、NCEP風資料の等質性が確保されているとみなされる1958～1998年の41年間では、風速は傾向変動をもたないのに対して、波高は減少傾向にあるか、あるいは傾向変動を伴わず、少なくとも増加傾向にないと判断される。風速と波高の傾向変動の相違は、波浪が局所的な風場のみならず広域的な風場に依存するためである。

5. 結 語

本研究で得られた知見は次のようである。

- ①観測資料の期間は1年以下と短いけれども、推算波浪は韓国沿岸に配置された複数の波浪観測地点における観測波浪と比較的よく符合する。
- ②51年間のNCEP風資料には、1948～1957年の最初の10年間で風速の増加傾向が出現する。これは観測資料の不足や観測方法および観測時間などの変更によって生じたNCEP風資料の質的变化を反映すると考えられる。した

がって、風速および波高の傾向変動の解析には、1958年以降の41年間のNCEP風資料および推算波浪資料を用いるのが適当である。

③経年的に等質性をもつとみなされる1958～1998年の41年間のNCEP風資料およびこれを用いて得た推算波浪資料に対する傾向変動の解析によれば、統計的有意性を考慮する場合、韓国沿岸における風速は傾向変動をもたないのに対して、波高は減少傾向にあるか、あるいは傾向変動を伴わないと判断される。

謝辞： NCEP/NCAR表面風再解析値データセットを提供戴いたNCAR（国立大気研究センター）ならびに本研究の端緒を与えて戴いた韓国（株）唯一総合技術團代表理事 李 義允氏に謝意を表する。また、本研究は日本学術振興会基盤研究(C)(2)（課題番号13680546、代表 畑田佳男）による研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) Günther, H. et al. : The wave climate of the northeast Atlantic over the periods 1955-1994; The WASA wave hindcast, *Global Atmos. and Ocean System*, Vol. 6, pp.121-163, 1998.
- 2) Cox, A. T. and Swail, V. R. : A global wave hindcast over the period 1958-1997 : Validation and climate assessment, *Jour. Geophys. Res.*, Vol.106, No. C2, pp.2313-2329, 2001.
- 3) 山口正隆, 畑田佳男, 大福 学, 李 敏杰, 野中浩一, 野間 敬 : わが国沿岸海域任意地点における波浪の51年推算システム, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.276-280, 2000.
- 4) 畑田佳男, 山口正隆, 大福 学, 李 敏杰, 野中浩一 : 51年波浪推算に基づく北西太平洋における波高の傾向変動の解析, 自然災害科学 JJSNDS, 20-4, pp.435-448, 2002.
- 5) 畑田佳男, 山口正隆, 大福 学, 李 敏杰, 野中浩一 : わが国沿岸での長期波浪推算資料に基づく波高の傾向変動の解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1346-1350, 2002.
- 6) 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浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, No.381 / II-7, pp.151-160, 1987.
- 7) 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.
- 8) 鈴木栄一 : 気象統計学 (第5版), 地人書館, 1975.

(2002. 9. 30受付)