

論文

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

畑田 佳男*・山口 正隆*・大福 学*・李 敏杰*・野中 浩一**

51-Year Wave Hindcast and Analysis of Wave Height Climate Trend on the Northwestern Pacific Ocean

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

Abstract

Hourly-wave hindcastings over a period of 51 years from 1948 to 1998 are conducted location by location at 52 properly-selected points on the Northwestern Pacific Ocean by applying a shallow water wave model with use of a backward ray tracing method on a grid with 5 km space resolution. The input wind data are extracted from the 6-hourly NCEP/NCAR reanalysis surface wind data archive. Comparison with measurement data for winds and waves at buoy stations in the recent 10 years verifies generally reasonable estimates of reanalysis wind data and hindcast wave data for monthly- or yearly-grouped mean and highest 1/3 mean values. The main conclusions are that remarkable increasing trends of winds and the resulting waves in the first 10 years from 1948 to 1957 are probably related to the wind data quality problem and that increasing trends of both wind and wave climate parameters during the recent 41 years are found on the Northwestern Pacific Ocean area where the strength intensifies toward the northeast sea area, while statistically significant trends over the same period are not detected on the sea area around Japan.

キーワード：51年波浪推算，NCEP風資料，波高の傾向変動，北西太平洋

Key words：51-year wave hindcast, NCEP wind data, trend of wave height climate, the Northwestern Pacific Ocean

* 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

本報告に対する討論は平成14年9月末日まで受け付ける。

1. 緒言

波候の長期変動、とくに波高の経年的増加は波浪災害のポテンシャルを高めるとともに、海岸・海洋構造物の安全性に深刻な影響をもたらす可能性をもつことから、その解明が重大な関心事になっている。山口・他¹⁾はわが国沿岸における最長20年間の波浪観測資料および波浪推算資料の検討に基づいて、最近20年間の波高に有意な傾向変動が見出されないことを示唆している。しかし、波高の傾向変動をより適切に評価するためには、できるだけ長い期間の波浪資料に基づく検討が望ましい。一方、外洋では、北大西洋における波高が北東部で経年的に増加傾向、南側中央部で減少傾向にあることが波浪観測資料や波浪推算資料の解析に基づいて指摘^{2)~5)}されており、資料期間も最長40年に及んでいる。また、全球規模の波浪推算と波候の検討が鈴木・他⁶⁾、Sterl & Komen⁷⁾により行われているが、推算期間は15年と短いのに対し、最近Cox & Swail⁸⁾は1958~1997年の40年間にわたる波浪推算と波高の傾向変動解析を実施している。彼等の波浪推算に用いられているNCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research; アメリカ合衆国環境予測センター/大気研究センター)による6時間間隔の10m高度表面風再解析値資料(NCEP風資料)は、データの等質性を確保するため全期間で同一の品質管理データ同化システムによって作成されているので、NCEP風資料を入力条件として得られる波浪推算資料は波候の傾向変動の検討に適していると考えられる。しかし、波浪推算における空間解像度が緯度1.25°、経度2.5°と相対的に低いため、日本周辺海域など縁辺海における波候とその傾向変動の検討は不十分なものにならざるを得ない。また、山口・他⁹⁾は1948~1998年の51年間にわたるNCEP風資料を入力条件として高地形解像度計算に対応可能な1点浅海モデル¹⁰⁾に基づくわが国周辺海域での51年波浪推算システムを開発しているが、その適用は四国沖に設置されている気象庁海洋観測ブイ(B21004)の1地点に限られて

いる。

そこで、本研究では、北西太平洋海域を覆うように設けた52地点別々に51年波浪推算システムを適用して波浪の長期推算を行い、複数地点の気象庁海洋観測ブイで得られた長期風・波高観測資料との比較によりNCEP風資料や推算波高資料の精度を検討したのち、51年に及ぶNCEP風資料および波高推算資料の解析に基づいて北西太平洋海域における風速と波高の傾向変動を調査する。

2. 51年波浪推算システム⁹⁾の概要

2.1 海上風資料

波浪推算に使用するNCEP風資料は、1948年1月1日0時~1998年12月31日18時の51年間において世界標準時(UTC)0時、6時、12時、18時の6時間ごとに全球を192×94で分割したガウス座標格子網上で与えられる、NCEP/NCAR Global Reanalysis Archive ds090.0より採録する。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。そして、波浪推算に直接使用する海上風資料とするため、緯度・経度座標表示のNCEP風速成分を北西太平洋領域に設けた格子間隔80kmの直交格子網(45×45)上に2次元4点補間することによって、51年間にわたるNCEP風速成分資料のデータセットを作成する。

2.2 波浪推算モデル

1点浅海モデル¹⁰⁾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。本モデルは第1世代に属するが、その精度は第3世代モデルであるWAMと比べても遜色ない¹¹⁾。NCEP風資料は空間解像度の不足のため、高風速時ほど現実の風速より小さい風速を与えるので、ここでは波浪推算モデルにおいて高風速時ほど波の発達率を増加させるように発達項の係数を変更することにより、波高観測資料との対応を向上させる手法を便宜的に採用する。すなわち、1点浅海モデ

ルの Miles 機構に基づく波の発達率を表す式、

$$B = 0.30(u_w/c)^{1.35} f \cdot \exp\{-\alpha(c/u_w)^2\} \exp\{-0.5(u_w/c)\} \cos(\theta - \theta_w) \quad (1)$$

において、 $\alpha = 4.5 \times 10^{-3}$ とする。ここに、 u_w : 摩擦速度、 c : 成分波の波速、 f : 周波数、 θ : 方向角、 θ_w : 風向、である。

計算対象領域はおおよそ北緯 20 ~ 43°、東経 120 ~ 152° の北西太平洋、東シナ海および日本海からなる海域である。波浪推算では Fig. 1 に示すように、北西太平洋領域を格子間隔 $\Delta x = 5$ km で 673×673 に分割した大領域格子網 (南北 3360 km、東西 3360 km) を使用する。波浪推算の計算時間間隔は 1 時間、期間は 51 年、波浪推算地点は北西太平洋海域に任意に設けた 52 地点であり、気象庁海洋観測ブイである B 21001 (仙台沖)、B 21002 (日本海)、B 21004 (四国沖) および B 22001 (東シナ海) の 4 ブイ地点を含む。外洋境界近く波浪推算地点は、波浪の発達領域を確保するため、NCEP 風資料の領域境界線より約 700 km 内側に位置するように配置している。波浪推算にあたり、直交格子網上の 6 時間間隔 NCEP 風速成分を 1 時間ごとに線形補間したのち、各成分波の波向線上における風速成分を 2 次元 4 点補間式の適用により推定する。

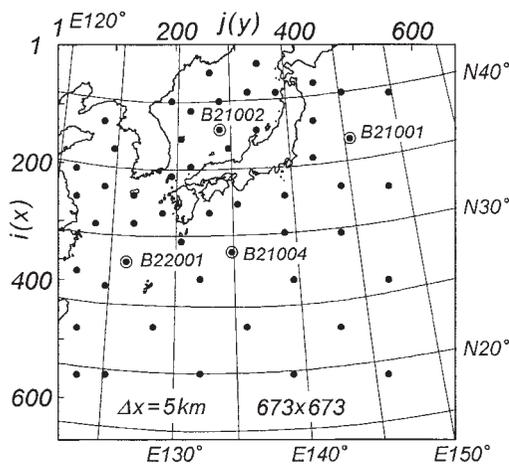


Fig.1 Computation area on the Northwestern Pacific Ocean and location of 52 wave hindcast points including 4 buoy stations.

境界条件は陸上境界で方向スペクトルの値を 0 とすることにより、開境界で局所風速に対する修正 P-M スペクトルと局所風向に対する $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数の積で表される方向スペクトル¹⁰⁾ とすることにより与える。計算に用いる周波数データの個数は 0.04 ~ 0.5 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 0° を N として反時計回りに定義する。

2.3 波浪時系列資料の解析法

波候解析は、累年単位と各年・各月単位で実施する。本論文で取りあげる波候代表量は、波高資料の平均値 \bar{H} と標準偏差 H_σ 、波高資料の上位 1/3 および 1/10 個の平均値 (1/3 最大波高 $H_{1/3}$ 、1/10 最大波高 $H_{1/10}$) である。上位波高資料の平均値 $H_{1/3}$ および $H_{1/10}$ の使用は高波高部を検討対象とするためである。一方、波浪推算精度を検討するために使用する誤差指標は、累年 (全観測期間) の特別波高推算資料と観測資料、あるいは推算資料と観測資料に基づく月別波高代表量間の相関係数 ($\rho_H, \rho(\bar{H})$ など)、相関図において両資料の関係を原点を通る直線によって近似した場合の勾配値 ($a_{0H}, a_0(\bar{H})$ など)、および累年の特別波高推算資料と観測資料との差の 2 乗平均平方根値 (σ_H) である。

長期推算資料に基づく波高の傾向変動解析では、各種年別波高資料 ($\bar{H}, H_{1/3}, H_{1/10}$) に 1 次式、たとえば平均波高 \bar{H} の場合、 $\bar{H} = a(\bar{H})t + b(\bar{H})$; t : 年数、 $a(\bar{H})$: \bar{H} 資料に対する勾配値、 $b(\bar{H})$: \bar{H} 資料に対する切片、をあてはめたのち、最小 2 乗法により係数を推定する。そのうち、勾配値 $a(\bar{H})$ はその符号により波高の増加・減少傾向をみるために使用する。また、波高の傾向変動に対する統計的有意性をトレンド示数 I_T により判別する¹²⁾。すなわち、約 20 個以上の時系列資料に対して、ほぼ有意水準 5% で $I_T > 1.65$ の場合増加傾向、 $I_T < -1.65$ の場合減少傾向と判定する。

なお、NCEP 風資料に対する風候およびその傾向変動の解析も同様の方法によるが、累年単位の

風候代表量に全風速資料および 10 m/s 以上の強風資料の方向別出現率を加える。

3. 風資料および波高資料の精度の検討

3.1 風観測資料との比較

ここでは、気象庁海洋観測ブイにおける観測風資料が NCEP 風資料の作成に際しデータ同化されていないと仮定して、両者の比較を進める。また、観測風資料の精度が必ずしも高くないことを考慮して、海上 7.5 m 高度における観測風速の 10 m 高度風速への変換は行っていない。

Fig. 2 は 3 時間ごとの NCEP 風速資料と観測風速資料の相関を相対出現率の等値線分布として 4 ブイ地点で示したものである。また、Table 1 は NCEP 風速資料および観測風速資料の平均値 (\bar{U}_{cal} , \bar{U}_{obs}) と標準偏差 ($U_{\sigma cal}$, $U_{\sigma obs}$)、両資料の相関係数 ρ_U 、相関図において原点を通る直線の勾配値 a_{0U} 、2 乗平均風速誤差 σ_U 、測得率 r_U および観測期間の一覧を与える。比較に用いる観測資料の期間は B 21001 を除く 3 ブイ地点で 1989 ~ 1998 年の 10 年間、B 21001 で 1983 ~ 1990 年の 8 年間である。B 21001 は 1991 年に撤去され

ており、しかも観測期間中の 1986 年以前と 1987 年以降で設置位置が若干異なるが、この相違を無視する。

さて、B 21001 を除く 3 ブイ地点では、等値線は扁平な楕円形状をとり、両者の相関は比較的高いが、B 21001 では幅広い楕円状等値線が示すように、個々の資料値はやや幅広く分布し、両資料の相関は相対的に低くなっている。また、NCEP 風速は高風速時ほど観測風速より小さい値を与える傾向にあり、B 21002 でその特徴が著しい。風速代表量のうち平均風速 \bar{U} に関しては、B 21002 で NCEP 風資料が観測資料より小さい値を与える以外、両資料は比較的良好に符合するが、標準偏差 U_{σ} については、いずれのブイでも NCEP 風資料が観測資料より小さい値を示す。これは NCEP 風速が高風速部ほど観測風速より低い傾向を反映する。誤差指標でみれば、相関係数 ρ_U は 0.680 ~ 0.778 の範囲にあり、B 21001 を除いて NCEP 風資料と観測資料の相関は比較的高い。勾配値 a_{0U} は 0.820 ~ 0.932 をとる。すなわち、NCEP 風速は高風速時ほど観測風速より小さい傾向にあり、B 21002 でその特性が顕著である。2 乗平均風速

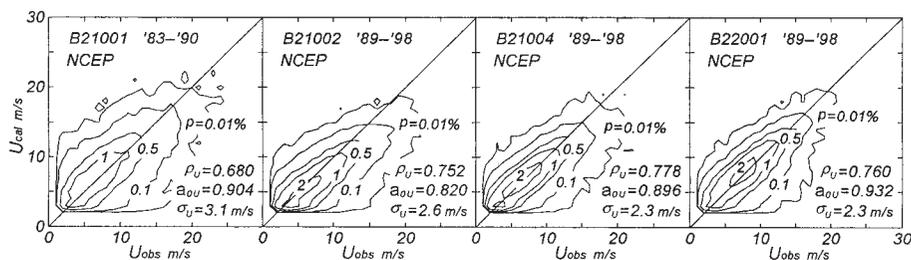


Fig.2 Contour plot of relative occurrence frequency in a scatter diagram between reanalysis and measurement data for 3-hourly wind speed at 4 buoy stations.

Table 1 Wind speed climate parameters based on reanalysis and measurement data and their error statistics.

Buoy	\bar{U}_{cal}	\bar{U}_{obs}	$U_{\sigma cal}$	$U_{\sigma obs}$	ρ_U	a_{0U}	σ_U	r_U	period
B21001	7.3	7.3	3.5	4.1	0.680	0.904	3.1	0.661	1983~1990
B21002	6.0	6.7	3.0	3.8	0.752	0.820	2.6	0.961	1989~1998
B21004	6.3	6.5	2.9	3.6	0.778	0.896	2.3	0.980	1989~1998
B22001	7.1	7.1	3.1	3.5	0.760	0.932	2.3	0.939	1989~1998

\bar{U}_{cal} , \bar{U}_{obs} , $U_{\sigma cal}$, $U_{\sigma obs}$, σ_U : m/s

誤差 σ_U は 2.3 ~ 3.1 m/s の範囲にあり, B 21001 で最も大きい。

Fig. 3 は NCEP 風資料と観測資料より得た月別風速代表量, すなわち平均風速 \bar{U} , 1/3 最大風速 $U_{1/3}$, 1/10 最大風速 $U_{1/10}$ の関係をそれぞれ表す。両資料による平均風速 \bar{U} は B 21002 で NCEP 風資料が観測資料より小さい値を与える以外, 平均的によく符合する。1/3 最大風速 $U_{1/3}$ は B 21001 と B 22001 で比較的良好に対応するが, B 21004 と B 21002 で NCEP 風資料が観測資料より小さい値を与え, 1/10 最大風速 $U_{1/10}$ は全地点でその傾向を明瞭に示す。

Fig. 4 は 22.5° ごとに整理した全風速資料および 10 m/s 以上の強風資料の方向別出現率に対する比較図である。いずれの全風速資料も, 全方向からほぼ同じ割合で吹送し特定の方向に集中しない傾向を与えるが, B 21001 と B 21002 では観測資料に基づく N 方向の出現率がより大きい。両資料に基づく強風出現率は, B 21001 と B 21002 で NCEP 風資料における N 方向の出現率が観測資料におけるものより小さい点や, 分布形

状に対する多少の不整合を除いて, 比較的良好に符合する。すなわち, 両資料は強風の卓越風向を, 太平洋側の B 21001, B 21004 や日本海側の B 21002 で NW, 東シナ海側の B 22001 で N とするが, 観測資料は B 21001, B 21002 で NW ~ N のうちとくに N とする点で NCEP 風資料と異なる。

以上の考察から, NCEP 風資料は高風速時ほど観測資料より小さい風速を与え, B21002 について B21004 でその傾向が著しいことや, NCEP 風資料が B 21001 や B 21002 において N 方向の出現率を低めに与える点を除いて, 両資料に基づく結果は比較的良好に対応することがわかる。

3.2 波高観測資料との比較

ブイにおける有義波高観測資料は 1990 年 8 月 1 日 6 時 (JMT) 以前では 20 波の平均波高に 1.60 を乗じて得られているのに対して, 1990 年 8 月 1 日 9 時 (JMT) 以降の資料は有義波高 (波数は不明) として算定されたものであり, 1990 年 8 月 1 日以前の資料の質はあまりよいとは云え

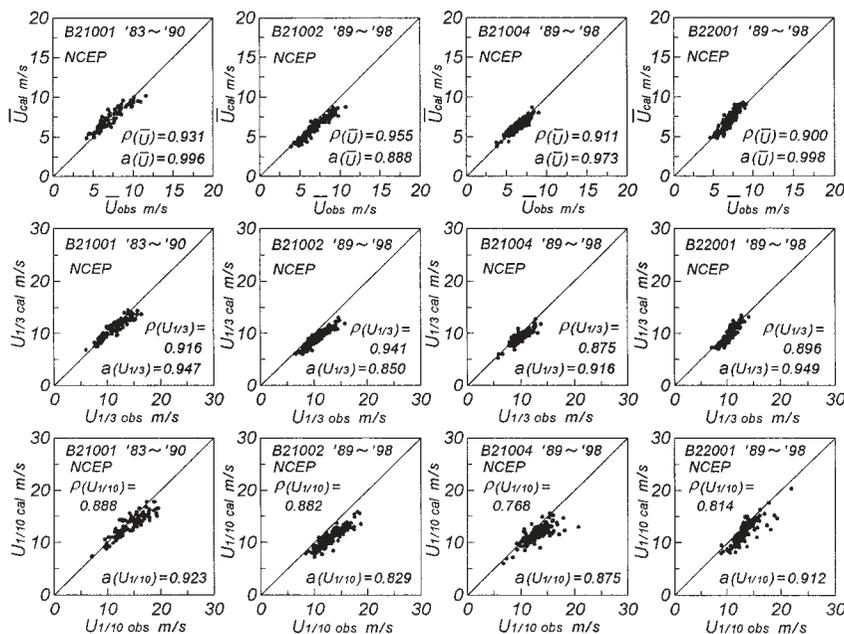


Fig.3 Comparison of monthly-grouped wind speed climate parameters based on reanalysis and measurement data at 4 buoy stations.

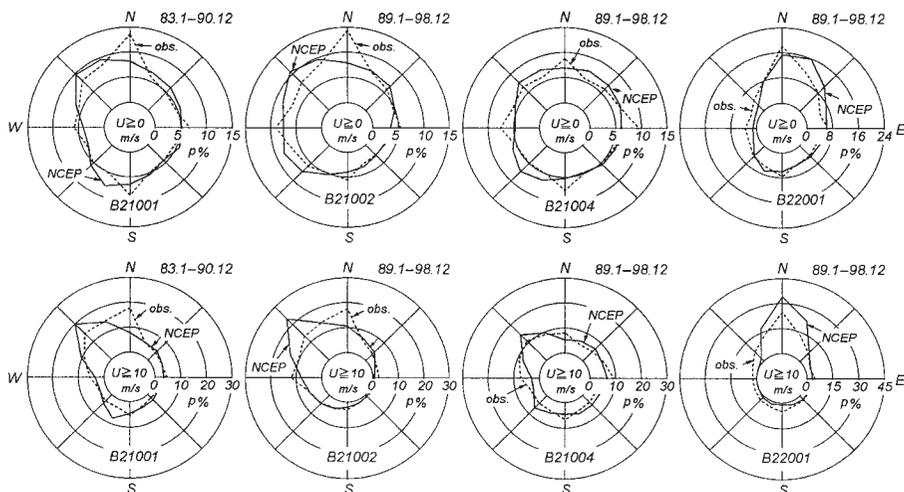


Fig.4 Comparison of direction-grouped occurrence rates of wind speed and high wind speed based on reanalysis and measurement data at 4 buoy stations.

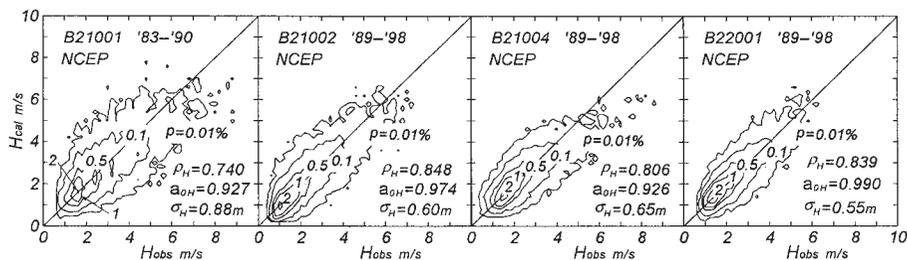


Fig.5 Contour plot of relative occurrence frequency in a scatter diagram between hindcast and measurement data for 3-hourly wave height at 4 buoy stations.

ない。

Fig. 5 は 1989 ~ 1998 年の 10 年間 (B 21004 では 1983 ~ 1990 年の 8 年間) における 3 時間ごとの推算波高資料と観測波高資料の相対出現率の等値線分布を示す。また、推算資料および観測資料に基づく波高の平均値 (H_{cal} , H_{obs}) と標準偏差 ($H_{\sigma cal}$, $H_{\sigma obs}$), 両資料の相関係数 ρ_H , 勾配値 a_{0H} , 2 乗平均波高誤差 σ_H , 測得率 r_H および観測期間を Table 2 に一括して表示する。図でみるように、いずれのブイ地点においても、推算資料と観測資料は比較的良好に符合するが、B 21001 では楕円状等値線が丸みを帯びて両資料の相関が他のブイ地点に比べて低いことや、B 21004 では高波

高時ほど推算波高が観測波高より小さくなることの方があがる。波高代表量でみれば、両資料に基づく平均波高 \bar{H} および標準偏差 H_{σ} は、B 21001 や B 21004 で推算資料に対応する標準偏差が観測資料よりやや大きい点や、B 22001 で推算資料に対応する平均値がやや小さい点を除いて、よく符合する。また、誤差指標によれば、推算資料は B 22001 や B 21002 で相対的に高い精度を示すが、B 21001 では推算資料は過小な傾向にあり、その精度も低いことを表す。

Fig. 6 は推算資料および観測資料に基づく月別波高代表量 \bar{H} , $H_{1/3}$, $H_{1/10}$ に対する相関図を表す。平均波高 \bar{H} に関して、推算資料と観測資料は B

21001 や B 21004 における高波高部を除き、全体的によく符合し、1/3 最大波高 $H_{1/3}$ についても同様のことが云える。しかし、より高波高部を代表する 1/10 最大波高 $H_{1/10}$ に関しては、推算資料が高波高時ほど観測資料より小さい値を与える傾向が顕著になる。これは高風速時ほど NCEP 風資料が観測資料より小さい特徴を反映するものであり、波浪推算モデルにおける波の発達項の変更によっても、高波高時の推算精度が必ずしも十分に向上しないことを表す。

Fig. 7 は年別波高代表量 \bar{H} , $H_{1/3}$, $H_{1/10}$ の経年

変化に対する比較を表す。上位波高資料を用いる波高代表量ほど大きい経年変動は、波高資料の測得率 r_H が低いため、さらに拡大される。推算資料と観測資料は平均波高 \bar{H} や 1/3 最大波高 $H_{1/3}$ に関して多少の隔たりを除き、平均的に比較的良好に対応するが、1/10 最大波高 $H_{1/10}$ に関して B 21004 や B 21001 では推算資料は観測資料よりかなり小さい値を与える。したがって、NCEP 風資料を入力条件とする波高推算資料を用いて波高の傾向変動を検討する場合、各種年別波高代表量のうち 1/10 最大波高 $H_{1/10}$ を除外し、平均波高

Table 2 Wave height climate parameters based on hindcast and measurement data and their error statistics.

Buoy	\bar{H}_{cal}	\bar{H}_{obs}	$H_{\sigma cal}$	$H_{\sigma obs}$	ρ_H	a_{0H}	σ_H	r_H	period
B21001	2.37	2.35	1.13	1.28	0.740	0.927	0.88	0.581	1983~1990
B21002	1.79	1.77	1.09	1.06	0.848	0.974	0.60	0.582	1989~1998
B21004	1.99	1.98	0.91	1.09	0.806	0.926	0.65	0.694	1989~1998
B22001	1.91	1.84	0.95	0.98	0.839	0.990	0.55	0.729	1989~1998

$\bar{H}_{cal}, \bar{H}_{obs}, H_{\sigma cal}, H_{\sigma obs}, \sigma_H : m$

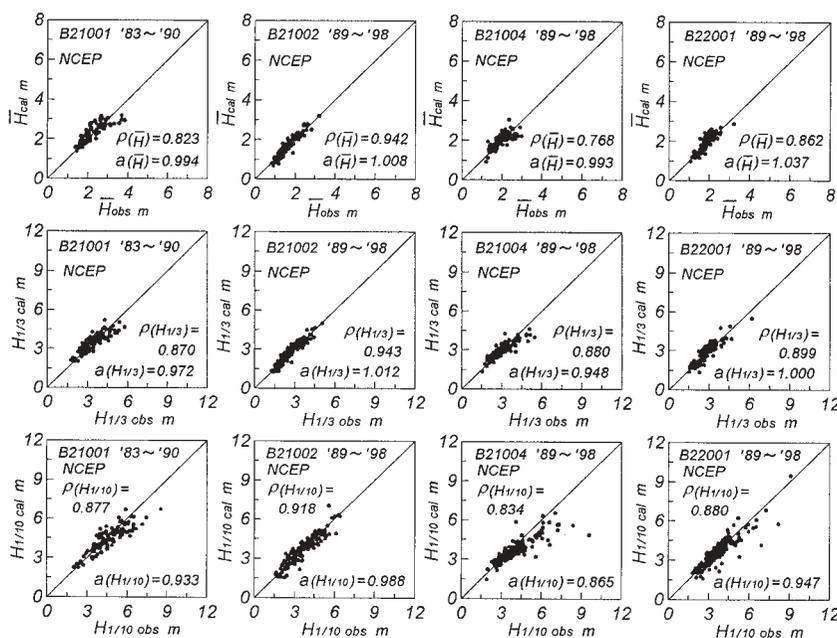


Fig.6 Comparison of monthly-grouped wave height climate parameters based on hindcast and measurement data at 4 buoy stations.

\bar{H} や $1/3$ 最大波高 $H_{1/3}$ を使用するのが適切であろう。

4. 北西太平洋における風速および波高の傾向変動

4.1 風速の傾向変動

Fig. 8 は 1948 ~ 1998 年の 51 年間にわたる NCEP 風速資料より得た平均風速 \bar{U} の平面分布を示す。平均風速 \bar{U} は陸上部および沿岸部で小さく、海上部で大きい。周辺を陸地に囲まれた日本海では、領域中央部で大きく、陸上部に近づくほ

ど小さくなる。東シナ海では、朝鮮半島周辺の 4 m/s 域から黄海を経て南部の 7 m/s 域に達する。北西太平洋では、領域東側の 6 m/s 域から北東部の 8 m/s 域および西側の東シナ海領域の 7 m/s に向けて増加し、また領域中央部より南西端領域の 6 m/s 域に向けて減少する。

Fig. 9 は B 21004 における 51 年間の NCEP 風速資料から得た年別風速代表量 \bar{U} , $U_{1/3}$ とそれらの累年平均値からの偏差 $\Delta\bar{U}$, $\Delta U_{1/3}$ を経年変化図として表したものである。いずれの風速代表量も

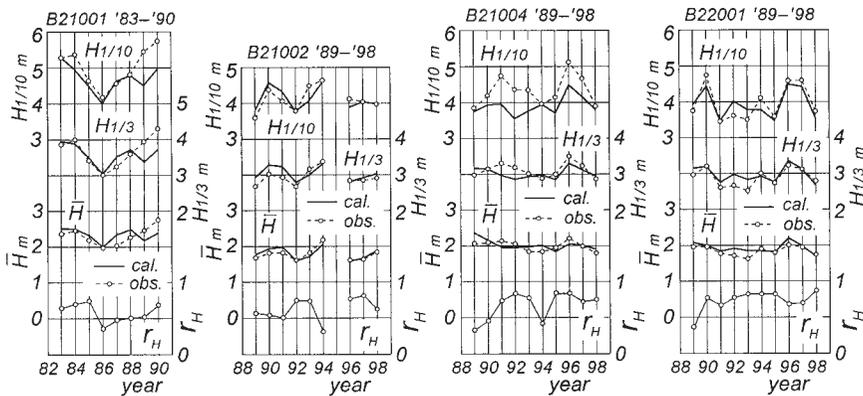


Fig.7 Comparison of yearly-grouped wave height climate parameters based on hindcast and measurement data at 4 buoy stations.

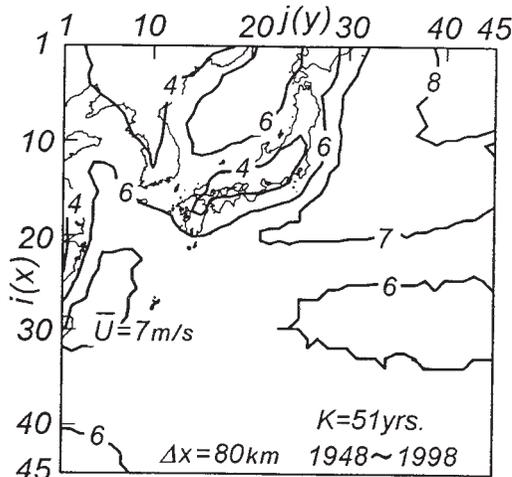


Fig.8 Mean wind speed during 51-year period over the Northwestern Pacific Ocean.

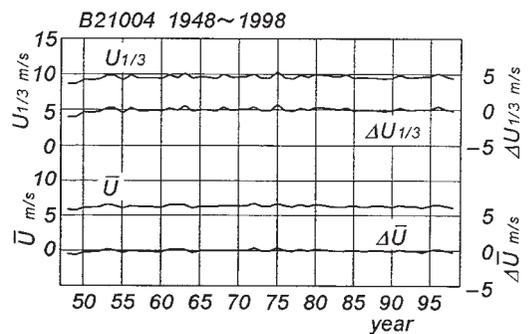


Fig.9 51-year variation of yearly-grouped wind speed climate parameters and their deviations from overall means based on reanalysis data at Buoy 21004.

1948～1957年の10年間で増加し、その後はほぼ一定値のまわりを変動する傾向を示す。同様の特徴は他の地点でも現れる。これは「気候ジャンプ」と呼ばれる自然現象というよりむしろ、1957年以前のNCEP風資料の信頼性が観測資料の不足のため相対的に低いことによると考えられる。そこで、傾向変動解析では、期間を1948～1998年の51年間と1958～1998年の41年間の2種類に分けた資料を用いる、

Fig. 10は海上に位置する格子点での年別平均風速資料にあてはめた1次回帰式の勾配値 $a(\bar{U})$ とトレンド示数 $I_T(\bar{U})$ の平面分布を51年間資料および41年間資料について示す。51年間資料に

よると、勾配値 $a(\bar{U})$ は日本太平洋側の中部地方沖合海域や東シナ海に面する中国沿岸、台湾東側海域、北西太平洋南方海域で負値を、また東シナ海、日本海、北西太平洋海域中央部と北東部で正値をとり、とくに中央部から北東部に向けて増加する。トレンド示数 $I_T(\bar{U})$ も勾配値 $a(\bar{U})$ と同様の空間分布を示すが、統計的に有意な増加・減少傾向を表すトレンド示数のおおよその限界値を $I_T(\bar{U}) = \pm 2$ とすれば、中部地方沖合海域を除く上記の海域や日本海中央部より日本側の海域で平均風速 \bar{U} の傾向変動が認められ、北西太平洋海域北東部や南西部ほど強くなる。このうち日本沿岸に注目すると、太平洋側の東北沿岸から九州東岸

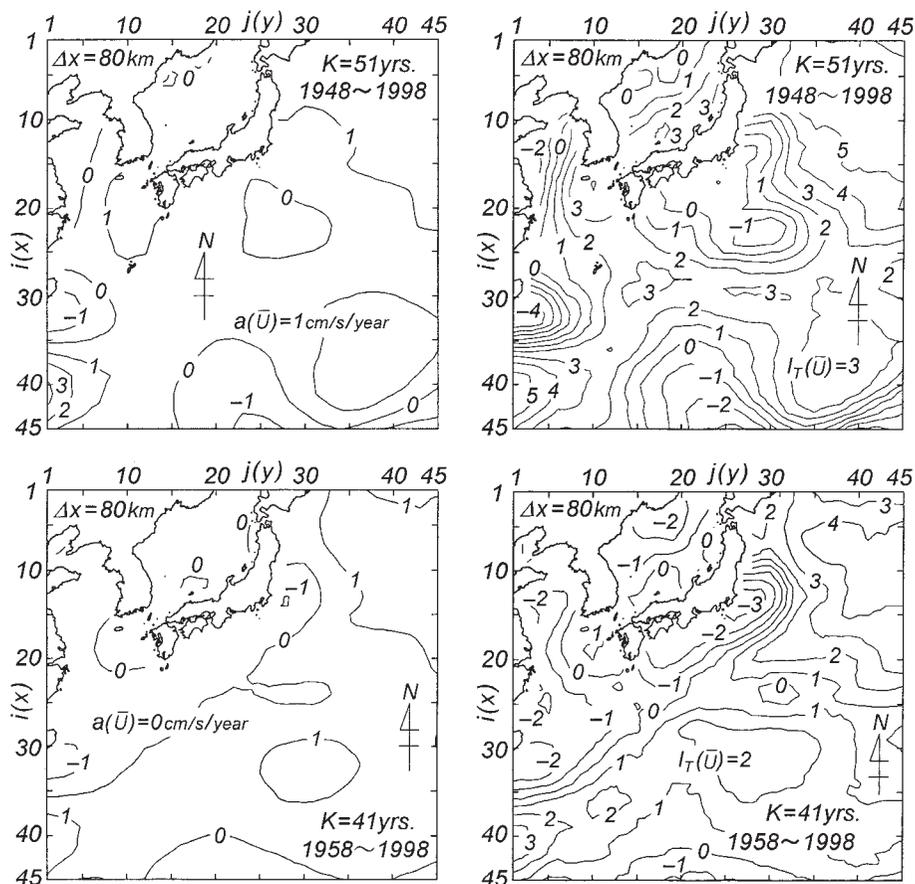


Fig. 10 Analysis for trend of mean wind speed over the Northwestern Pacific Ocean based on reanalysis data.

では平均風速 \bar{U} の増加傾向は得られないが、太平洋岸の北海道沿岸から東北沿岸、日本海沿岸から東シナ海沿岸、南西諸島で有意な増加傾向が現れる。

41年間資料によると、Fig. 9における風速代表量の経年変化から明らかのように、勾配値 $a(\bar{U})$ は51年間資料の場合に比べて減少するので、負値をとる海域が拡大する。東シナ海のうち朝鮮半島南部沖合から九州西岸にかけての北東部を除く広範な海域、および日本海のうち日本沿岸部を除く海域で負値を示す。トレンド示数 $I_T(\bar{U})$ の平面分布図によれば、平均風速 \bar{U} の統計的に有意な増加傾向は北西太平洋海域南西部から中央部や北東部でみられ、しかも北東部に向けて強くなる。また有意な減少傾向は中国沿岸やロシア沿岸の一部の海域および日本の太平洋側東北沿岸から九州東岸にかけて認められるが、その傾向はあまり強くない。日本沿岸に注目すると、平均風速 \bar{U} の有意な傾向変動は日本海沿岸から九州の東シナ海沿岸、南西諸島にかけてほとんど検出されず、太平洋側の北海道沿岸から東北沿岸北部で弱い増加傾向、東北沿岸南部から九州東岸にかけて弱い減少傾向にあると云える。

Fig. 11は41年間資料に基づく1/3最大風速 $U_{1/3}$ に対する勾配値 $a(U_{1/3})$ とトレンド示数 $I_T(U_{1/3})$ の平面分布図である。勾配値 $a(U_{1/3})$ は

北西太平洋海域南西部から中央部を経て東部、北東部の広範な海域で正值をとり、中央部から北東部あるいは南西部に向けて増加する挙動や、日本海のうち日本沿岸を除く海域、東シナ海の西部、日本の太平洋側東北沿岸から九州東岸で負値を与える挙動は平均風速 \bar{U} に対するものと類似する。このため、トレンド示数 $I_T(U_{1/3})$ も $I_T(\bar{U})$ と同様の空間分布を与えるけれども、日本海や東シナ海の中国沿岸では統計的有意性を表す $I_T(U_{1/3}) < -2$ の領域はみられず、日本沿岸太平洋側における $I_T(U_{1/3}) < -2$ の領域も関東沿岸に縮小する。要するに41年間資料によれば、日本周辺海域では、太平洋側の北海道東部沿岸や関東沿岸を除いて、1/3最大風速 $U_{1/3}$ の有意な増加・減少傾向は認められない。

4.2 波高の傾向変動

Fig. 12は52地点における41年間の平均波高資料および1/3最大波高資料に加重1次補間法¹³⁾を適用して得た80km間隔の格子点値を平面分布として表したものである。51年間資料に基づく結果は、値がやや小さいがほぼ同様の平面分布を示すので、与えていない。これによると、平均波高 \bar{H} は日本海で西側沿岸部の1mから北東部の1.5m、東シナ海で北部の1mから南部の1.75mに向けて増加する。北西太平洋海域では

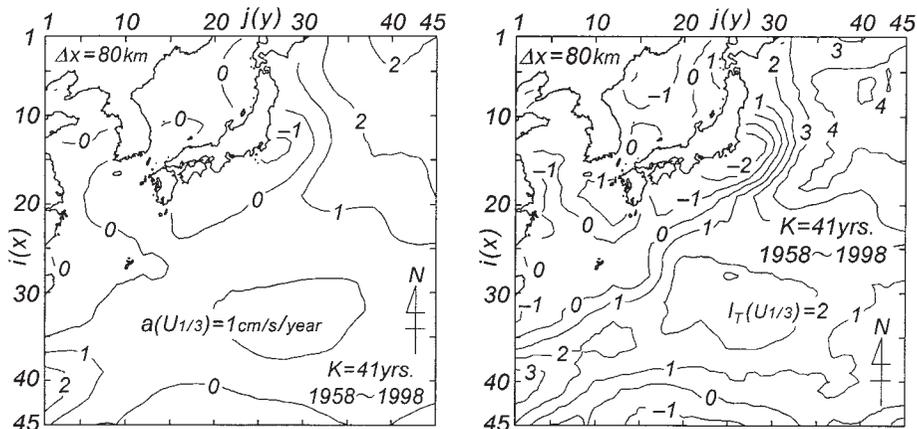


Fig. 11 Analysis for trend of highest 1/3 mean wind speed over the Northwestern Pacific Ocean based on reanalysis data.

1.75 ~ 2 m 域が広範に分布し、北東部で 2.25 m 以上に達する。1/3 最大波高 $H_{1/3}$ も平均波高 \bar{H} の 1.6 倍程度の値をとって同様の平面分布を示し、北西太平洋海域北東部の一部には 4 m 域も出現する。

Fig. 13 は B21004 における 51 年間の年別波高代表量 \bar{H} , $H_{1/3}$ とそれらの累年平均値からの偏差 $\Delta\bar{H}$, $\Delta H_{1/3}$ の経年変化図である。NCEP 風資料の特性を反映して、波高代表量も風速代表量と同様に、1948 ~ 1957 年の 10 年間で増加傾向を示したのち、ほぼ一定値のまわりを変動することから、波高の傾向変動解析も 1948 ~ 1998 年の 51 年間資料および 1958 ~ 1998 年の 41 年間資料に対して実施する。

Fig. 14 は 51 年間資料および 41 年間資料に基づく年別平均波高 \bar{H} の勾配値 $a(\bar{H})$ とトレンド示数 $I_T(\bar{H})$ の平面分布を示す。51 年間資料によると、勾配値 $a(\bar{H})$ は黄海や日本海のロシア側および台湾南東側の狭い海域を除いて正值をとり、日本海や東シナ海および北西太平洋海域西側では、北西部から南東部に向けて、また北西太平洋海域では、中央部から北東部あるいは東部に向けて増加する。トレンド示数 $I_T(\bar{H})$ も同様の空間分布を示し、日本海の日本沿岸から東シナ海に面する九州西岸、南西諸島北側海域を経て台湾南東側海域に至る線より南東側あるいは東側の北西太平洋海

域で、平均波高 \bar{H} の有意な増加傾向を表す $I_T(\bar{H}) > 2$ の海域が広範に現れる。とくに北西太平洋海域中央部から北東部に向かうほどトレンド示数 $I_T(\bar{H})$ が増大して、平均波高 \bar{H} の増加傾向が強くなる。日本周辺海域では、太平洋側の関東沖合から四国沖を除いて、平均波高 \bar{H} の有意な傾向変動が抽出され、東北沿岸から北海道沿岸に向けて増加傾向が強くなる。年別平均波高資料に対する勾配値 $a(\bar{H})$ や $I_T(\bar{H})$ の空間分布は年別平均風速資料に対する勾配値 $a(\bar{U})$ や $I_T(\bar{U})$ の空間分布と類似するが、波浪は特定地点の風特性のみならず広域的な風特性に依存することから、トレンド示数 $I_T(\bar{H})$ がトレンド示数 $I_T(\bar{U})$ より大きい値

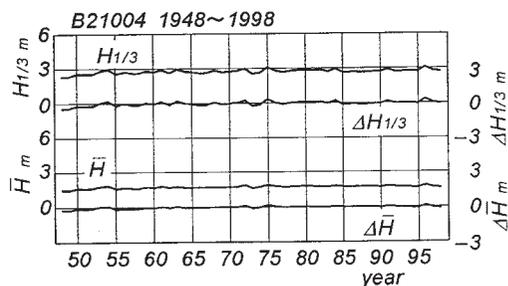


Fig.13 51-year variation of yearly-grouped wave height climate parameters and their deviations from overall means based on hindcast data at Buoy 21004.

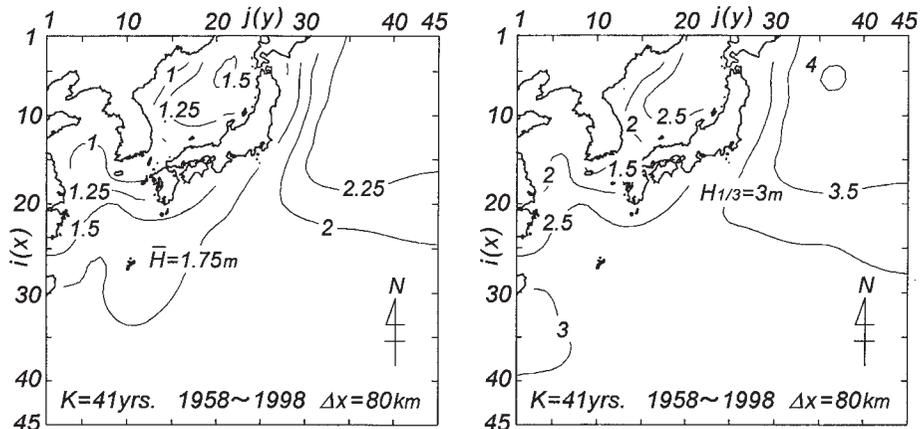


Fig.12 Mean wave height and highest 1/3 mean wave height during 41-year period on the Northwestern Pacific Ocean.

をとり、その結果トレンド示数 $I_T(\bar{H})$ が負値を示す海域は狭くなる。

41年間資料も勾配値 $a(\bar{H})$ やトレンド示数 $I_T(\bar{H})$ に対して51年間資料と同様の空間分布を示す。しかし、41年間資料は51年間資料に比べて小さい勾配値 $a(\bar{H})$ を与えることから、平均波高 \bar{H} が有意な増加傾向にある海域は狭くなり、逆に減少傾向にある海域が日本海ロシア側の一部や韓国済州島付近に現れる。ただし、北西太平洋海域中央部から北東部に向けて増加傾向が強くなる特徴は変わらない。また日本周辺の海域をみると、北海道沿岸から九州沿岸、南西諸島に至る広大な沿岸域で平均波高 \bar{H} の有意な傾向変動は検出されず、統計的に有意性は保証されないものの、太

平洋側の北海道沿岸から東北沿岸を除く日本本土沿岸では、むしろ平均波高 \bar{H} は減少傾向にある。

Fig. 15 は41年間資料より得た年別1/3最大波高資料の勾配値 $a(H_{1/3})$ とトレンド示数 $I_T(H_{1/3})$ の平面分布図である。勾配値 $a(H_{1/3})$ は $a(\bar{H})$ と同様に東シナ海、日本海、北西太平洋海域西側で北西部から南東部に向けて、また北西太平洋海域中央部より北東部に向けて増加し、北東部海域で大きい値をとるが、負値を示す海域が日本海、東シナ海、日本の太平洋側東北沿岸から四国沿岸で広範囲に出現する。トレンド示数 $I_T(H_{1/3})$ も $I_T(\bar{H})$ と同様の分布特性を示し、1/3最大波高 $H_{1/3}$ の有意な増加傾向は北西太平洋海域中央部から北東部に向けて強くなる。また、日本海、東

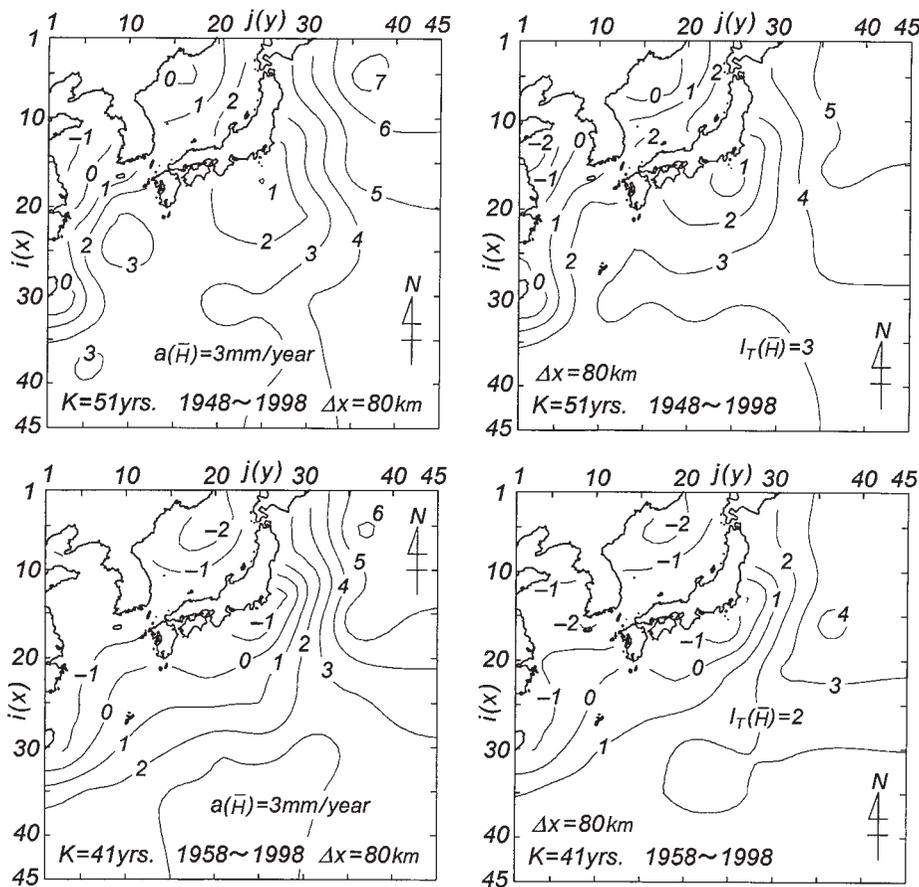


Fig.14 Analysis for trend of mean wave height on the Northwestern Pacific Ocean based on hindcast data.

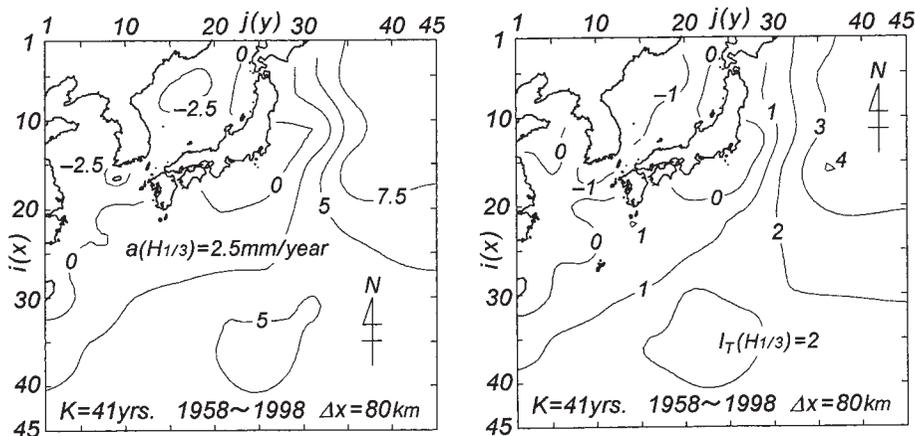


Fig. 15 Analysis for trend of highest 1/3 mean wave height on the Northwestern Pacific Ocean based on hindcast data.

シナ海、日本沿岸の太平洋側海域など日本周辺の広範な海域で 1/3 最大波高 $H_{1/3}$ の有意な傾向変動は抽出されない。以上に述べた北西太平洋海域における波高変化率の空間分布パターンは Cox & Swail⁸⁾ によるものと定性的に符合する。

5. 結 語

本研究では 51 年間（1948～1998 年）の NCEP 風資料，およびこれを入力条件とする 1 点浅海モデルに基づく北西太平洋海域内 52 地点の長期波浪推算資料を用いて，わが国周辺に配置された 4 基のブイにおける観測資料との比較からその精度を検討するとともに，北西太平洋海域における風速および波高の傾向変動を調べた。得られた知見の概要は次のようである。

1) NCEP 風資料は風速および風向に対して観測風資料と比較的によく対応するが，高風速時ほど過小な風速を与える傾向にある。また NCEP 風資料を入力条件とする場合，波の発達項を調整した 1 点浅海モデルはブイにおける波高観測資料を一般的に高い精度で再現するが，NCEP 風資料の特性を反映して高波高部ほど波高を低めに評価する傾向にある。したがって，傾向変動解析に用いる風速および波高代表量は年別の平均値や 1/3 最大値にとどめるのが適切である。

2) 1948～1998 年の 51 年間に及ぶ NCEP 風

資料やこれを用いた長期波浪推算資料から得られる風速および波高代表量は，1948～1957 年の最初の 10 年間で増加傾向をとり，その後一定値のまわりを変動する挙動を示す。これは自然現象というよりむしろ，当該期間における観測資料の不足に伴う NCEP 風資料の相対的に低い品質に起因すると考えられる。

3) 1958～1998 年の 41 年間資料によれば，風速および波高代表量の統計的に有意な増加傾向は北西太平洋海域中央部から北東部にかけて見出され，その傾向は北東部に向けて強くなる。また日本周辺の海域では，風速および波高代表量の有意な傾向変動はほとんど検出されず，統計的有意性を除外してみれば，風速および波高代表量はむしろ経年的に減少傾向にある。

最後に，NCEP/NCAR 表面風再解析値資料を提供して戴いた NCAR（アメリカ合衆国大気研究センター）およびブイ観測資料を供与頂いた気象庁海上気象課に謝意を表すとともに，本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究（C）（2）（課題番号 13680546，代表者 畑田佳男）による成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

1) 山口正隆・畑田佳男・大福 学・李 敏杰・野中 浩一：観測資料および推算資料に基づくわが国沿

- 岸での波浪の長期変動の解析, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1231-1235, 2000.
- 2) Carter, D.J.T. and L. Draper: Has the northeast Atlantic become rougher?, *Nature*, Vol.332, pp.494, 1988.
 - 3) Bacon, S. and D.J.T. Carter: Wave climate changes in the North Atlantic and North Sea, *Int. Jour. Climatol.*, Vol.11, pp.545-558, 1991.
 - 4) Kushnir, T., Cardone, V.J. and J.G. Greenwood: The recent increase in North Atlantic wave heights, *Jour. Climate*, Vol.10, pp.2107-2113, 1997.
 - 5) Günther, H. et al.: The wave climate of the northeast Atlantic over the period 1955-1994: The WASA wave hindcast, *Global Atmos. and Ocean System*, Vol. 6, pp.121-163, 1998.
 - 6) 鈴木 靖・岡田弘三・宇都宮好博・磯崎一郎: 波浪推算およびブイデータに基づく波浪の長期変動について, 1996年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 日本海洋学会, pp.217, 1996.
 - 7) Sterl, L. and G. J. Komen: Fifteen years of global wave hindcasts using winds from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis: Validating the reanalyzed winds and assessing the wave climate, *Jour. Geophys. Res.*, Vol.103, No.C3, pp. 5477-5492, 1998.
 - 8) Cox, A. T. and V. R. Swail: A global wave hindcast over the period 1958-1997: Validation and climate assessment, *Jour. Geophys. Res.*, Vol.106, No. C2, pp.2313-2329, 2001.
 - 9) 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.
 - 10) 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, 第381号/II-7, pp.151-160, 1987.
 - 11) 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.
 - 12) 鈴木栄一: 気象統計学(第5版), 地人書館, 314 p., 1975.
 - 13) 塩野清治・弘原海 清・升本真二: パソコンで不規則に分布するデータを格子データに変換してコンピュータマップに作成する方法(1) -加重一次補間法-, 情報地質(10), pp.65-78, 1985.

(投稿受理:平成13年6月7日
訂正稿受理:平成13年9月17日)