

NCEP/NCAR 再解析値を用いた北太平洋波候の解析

森 信人・安田誠宏・間瀬 肇

要 旨

NCEP/NCAR 再解析データの海上風を用いて北太平洋の長期波浪推算を行い、北太平洋および日本周辺の過去 50 年間の波浪の再現計算を行った。波浪推算値と洋上ブイ観測値と比較を行った結果、推算された波高と観測値の相関係数は 0.72 と再解析データの風速とほぼ同程度の精度を持つことを明らかにした。ついで、波高分布および極値統計分布の比較を行い、北太平洋における暴風時の波浪の分布特性について検討を行い、北太平洋および日本周辺の確率波高の空間分布を推定した。

キーワード：波浪推算，風波，波浪統計量，極値統計，波候

1. 序 論

近年の気象解析データの充実に伴い、長期的な波浪の変化（波候）の推算を行う動きが見られるようになってきた。Swail and Cox (2000) は、第 3 世代モデルに NCEP/NCAR (National Center for Environmental Protection/National Center for Atmospheric Research Institute) の再解析データを用いて 6 年間の北大西洋の波浪推算を行い、NCEP/NCAR の再解析データの海上風を用いて波浪推算を行った場合、低気圧来襲時の波高のピーク値を過小評価することを示している。さらに Cox and Swail (2001) は、NCEP/NCAR 再解析データを用いて、1958–1997 の 50 年間の波浪場の再現計算を行い、波浪推算結果をブイおよび衛星の高度計データと比較している。その結果、全球レベルで比較すると波浪推算結果は平均波高などの波浪の長期的傾向をよく再現していることがわかった。全球レベルでは波浪の長期的な変動は見られないものの、北太平洋の冬季季節風はここ 50 年間でやや強くなる傾向があることが示されている (Graham and Diaz, 2001)。ERA-40 を用いた波浪統計は殆ど行われていないが、オランダ気象庁が行った研究では、ERA-40 の有義波周期は高度計の値と高い相関を持つことが示されている (Caires et al., 2005)。しかしながら、これら長期波浪推算に関する研究は、気候・波候の傾向に着目したものであり、工学的に重要な波高分布や極値分布等の情報については殆ど触れられていない。

本研究では、波浪推算モデルに WAM モデル、海上風に NCEP/NCAR 再解析データを用いて北太平洋の長期波浪推算を行い、推算値とブイ観測値と比較する。さら

に、波高分布および極値統計分布の比較を行い、北太平洋における波浪の空間分布特性について明らかにする。

2. 研究手法の概要

2.1 計算手法および海上風データの概略

波浪モデルは WAM モデル (WAMDI-Group, 1988) を用い、風からのエネルギー入力項として Snyder, スペクトル間のエネルギー移送項に Hasselmann, エネルギー散逸項として Komen らのモデルの標準的な組み合わせを用いた。WAM モデルの支配方程式は、次式で表されるアクション平衡方程式である。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi N) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} N) + \frac{\partial}{\partial \omega} (\dot{\omega} N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} N) = S_{net} \quad (1)$$

ここで、緯度 ϕ および経度 λ は空間変数、 ω は角振動数、 θ は北を 0 方向に時計回りを正とした方向スペクトルの角度、 N は球面座標系におけるアクション密度 $N(\omega, \theta, \phi, \lambda, t)$ である。ソース項 S_{net} は海面における様々な物理機構に対する物理モデルの線形重ね合わせにより表される。海面における物理機構は次の 3 つに分類される。

S_{in} : 風から波へのエネルギー輸送の効果

S_{nl} : 非線形干渉により成分波間でやりとりされるエネルギー輸送の効果

S_{ds} : 砕波や底面摩擦によるエネルギー散逸の効果

波浪モデルでは、物理モデルの線形組み合わせとしてソース項が表されるのが一般的であり、第 3 世代の波浪モデルでは S_{nl} が組み込まれているのが特色である。

$$S_{net} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2)$$

2.2 計算条件

波浪モデルの計算座標には球面座標系が用いられ、Fig. 1(a) に示す範囲（北緯 0 度～65 度，東経 120 度～西経 110 度）を計算対象とした。格子間隔は 0.5 度，計算格子数 281×131 とし，海底地形は米国地球物理データセンター（NGDC）のデジタル地勢データ ETOPO5 を用い，300m 以深は深海条件として計算した。方向スペクトルの周波数分割数は 25，方向分割数は 12（30 度刻み）とした。

海上風データは，NCEP/NCAR の 6 時間間隔表面風解析値資料（NCEP 風資料と略記）の内，1948-2001 までの 54 年間分を使用した。NCEP 風資料の海上風の空間解像度は，約 2.5° とヨーロッパの European Centre for Medium-range Weather Forecasts（ECMWF）による 6 時間間隔 ECMWF 風資料の空間解像度（1.125° あるいは 0.5625°）に比べて低いが，現在利用可能な気象の再解析データとしては最も長期間を対象としており，衛星データを取り込んでいない 1979 年以前の品質に問題があるものの，今回はこれをそのまま利用することにした。

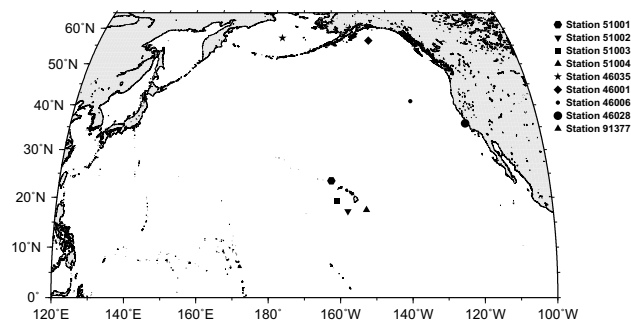
2.3 観測データの概略

推算値の精度検証のための観測データは，太平洋東側の各地点（Fig. 1(a) 参照）については，NOAA による波浪観測ブイ資料の内，代表的な 8 点のデータを用い，日本近海の各地点（Fig. 1(b) 参照）については，気象庁が超音波式センサーを用いて観測した気象庁波浪資料の内，観測記録の長い 7 点を用いた。NOAA の観測ブイ資料では海上風速 (U_{10} ，以下では単に風速と略記) も計測されているが，気象庁の波浪資料では波高と周期のみが記録されている。NOAA のブイは深海条件を満たす地点に設置されているが，気象庁の観測点は水深 50m の地点にあるため，両者の性質は若干異なることを付記する。これらの観測データは，共に 6 時間毎波浪状況のを定点観測した結果であり，それぞれの地点における観測記録長は，10～30 年であり，欠損値および無効な値を除いた有効なデータ数は約 2 万～3 万 6 千点であった。

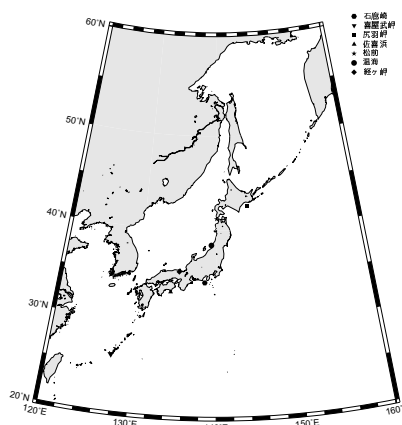
3. 観測データとの比較

推算値と観測値との定量的な相関関係を見るため，それぞれの平均値および標準偏差，相関係数，傾き，バイアスを求めた結果を Table 1 および 2 に示す。風速について見ると，相関係数は 0.7～0.8 と高いものの，傾きは 1 を若干下回り，全体として観測値に比べ推算値が低く現れている。

有義波高については，NOAA の観測ブイとの相関係数は最低でも 0.7 以上と風速と同程度の相関を持ち，傾きも 0.7 以上と高い値を示している。しかし気象庁のブイとの比較では，相関係数は 0.5 前後が多く，傾きも平均値



(a) NOAA buoy locations



(b) JMA buoy locations

Fig. 1 Computational domain and buoy locations

で 0.54 と NOAA 調査地点平均の 0.76 と比べても 0.22 低くなっている。原因としては，気象庁のブイの観測水深が約 50m と浅いこと，計算格子解像度が 0.5×0.5 度と粗く，地形の影響を十分に考慮できなかった点，気象の再解析において日本海側に観測点が少なく品質がそれほど高くない点などが考えられる。

推算された有義波周期と NOAA の観測ブイおよび気象庁のブイデータの差は，有義波周期で顕著であった。推算値と NOAA のブイデータの相関係数が 0.7 前後であるのに対し，推算値と気象庁のブイデータの相関係数は 0.6 以下とかなり低い。全般的に気象庁のブイにより観測された周期の分布は狭く，ばらつきが小さい。

以上の結果をデータ数で重みを与えて求めた平均的な相関係数，傾きおよびバイアスを Table 3 に示す。表より，NCEP/NCAR の海上風データを用いて推算された波高と観測値の相関係数は 0.72 と風速とほぼ同程度であ

Table 1 Comparison with NOAA Buoy

Loc.	Sample #		Mean		Std.		Corr.	Trend	Bias
			Obs.	Comp.	Obs.	Comp.			
51001	25214	U_{10}	6.68	6.78	2.53	2.53	0.807	0.808	1.39
	24478	H_s	2.46	2.08	0.911	0.778	0.848	0.724	0.292
	24476	T_s	6.73	8.31	1.44	1.78	0.453	1.088	0.950
51002	21448	U_{10}	7.66	6.84	2.38	1.96	0.775	0.639	1.94
	21556	H_s	2.43	1.92	0.666	0.659	0.704	0.697	0.224
		T_s	6.34	8.00	1.03	1.86	0.659	1.20	0.426
51003	22336	U_{10}	7.66	6.84	2.38	1.96	0.775	0.638	2.13
	22542	H_s	2.43	1.92	0.666	0.659	0.704	0.793	0.0757
	22541	T_s	6.70	8.21	1.12	1.88	0.722	1.21	0.0887
51004	21140	U_{10}	7.37	6.96	2.12	2.06	0.769	0.749	1.45
	20991	H_s	2.42	1.87	0.626	0.617	0.776	0.764	0.0243
		T_s	6.42	7.72	0.956	1.69	0.706	1.25	-0.281
46035	19906	U_{10}	8.45	8.49	3.97	4.11	0.785	0.813	1.62
	19256	H_s	2.63	2.60	1.56	1.43	0.889	0.816	0.451
		T_s	6.60	8.09	1.27	1.67	0.781	1.03	1.31
46001	34279	U_{10}	7.36	7.88	3.54	3.99	0.734	0.828	1.79
	35958	H_s	2.72	2.47	1.41	1.33	0.862	0.815	0.254
	33683	T_s	6.75	8.23	1.28	1.86	0.743	1.08	0.958
46006	24444	U_{10}	7.62	7.60	3.60	3.64	0.780	0.788	1.60
	26373	H_s	2.760	2.50	1.50	1.33	0.909	0.808	0.267
	26251	T_s	7.26	8.60	1.45	1.97	0.814	1.11	0.562
46028	21497	U_{10}	6.50	4.97	3.67	2.38	0.655	0.425	2.21
	20331	H_s	2.31	1.75	0.920	0.723	0.797	0.626	0.305
	20329	T_s	7.28	8.88	1.73	2.20	0.719	0.912	2.24

Table 2 Comparison with JMA Buoy

Loc.	Sample #		Mean		Std.		Corr.	Trend	Bias
			Obs.	Comp.	Obs.	Comp.			
Atsumi	27864	H_s	1.13	0.823	1.05	0.624	0.743	0.433	0.323
	27770	T_s	6.19	5.34	1.79	1.49	0.475	0.394	2.90
Irozaki	36391	H_s	1.21	1.31	0.664	0.615	0.394	0.266	0.297
		T_s	6.95	7.03	1.48	1.38	0.451	0.457	3.19
Kyanmisaki	26568	H_s	1.11	1.64	0.695	0.802	0.496	0.572	1.01
		T_s	7.42	6.80	1.44	1.11	0.542	0.415	3.72
Kyogamisaki	36374	H_s	1.13	0.835	0.950	0.659	0.781	0.541	0.225
		T_s	6.24	5.51	1.77	1.58	0.584	0.519	2.27
Matsumae	32715	H_s	0.996	0.895	0.789	0.731	0.705	0.654	0.244
	32663	T_s	5.73	5.44	1.52	1.37	0.471	0.424	3.01
Sakinohama	33148	H_s	0.939	1.20	0.588	0.653	0.591	0.656	0.581
		T_s	7.34	6.51	1.67	1.36	0.420	0.342	4.00
Shirihamisaki	21398	H_s	1.21	1.46	0.661	0.760	0.539	0.620	0.712
		T_s	7.43	7.05	1.72	1.54	0.456	0.409	4.01

り、傾きは全体で 0.65, NOAA のブイだけについて見ると 0.76 と観測値より約 25%~35% 低めに見積もられることがわかる。また、波高の推算値のバイアスは約 0.2m と十分小さいことがわかった。一方、周期については、相関係数が 0.6 と 0.1 以上小さくなり、バイアスも約 2s と大きい。但し、NOAA のブイデータのみについて見ると、相関係数は 0.70, バイアスは 0.78s と向上する。これらの結果より、波浪推算により計算された波高は、バイアスは殆ど無視できるものの、全体的に波高をやや小さめに見積もる傾向があることがわかった。

再解析データの風速や推算された波高の特性を詳しく

把握するため、風速および波高の出現頻度分布を観測値と比較したものを Fig. 2 に示す。図中の実線は再解析データもしくは推算値、点線は観測データより計算された出現分布である。北太平洋における再解析データの風速の出現分布の傾向は、分布のピークの出現位置が多少ずれる測点があるが、全般的に再解析データは観測値と良く一致しており、計算精度は高いといえる。ついで、有義波高の出現分布について見ると、波高の出現分布の形状は観測値と推算値で概ね一致しており、両者の出現分布に大きな違いは見られなかった。

Table 3 Summary of Validation (digitals in parentheses indicate NOAA buoy data)

	Corr.	Trand	Bias
U_{10}	0.77	0.71	1.71 [m/s]
H_s	0.72 (0.81)	0.65 (0.76)	0.26 [m] (0.21)
T_s	0.60 (0.70)	0.79 (1.11)	1.96[s] (0.78)

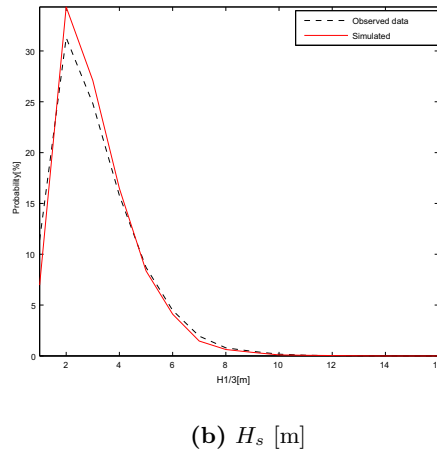
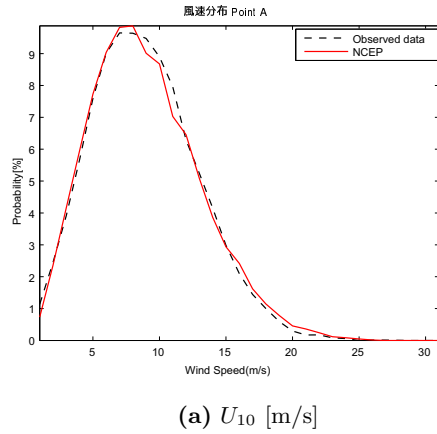
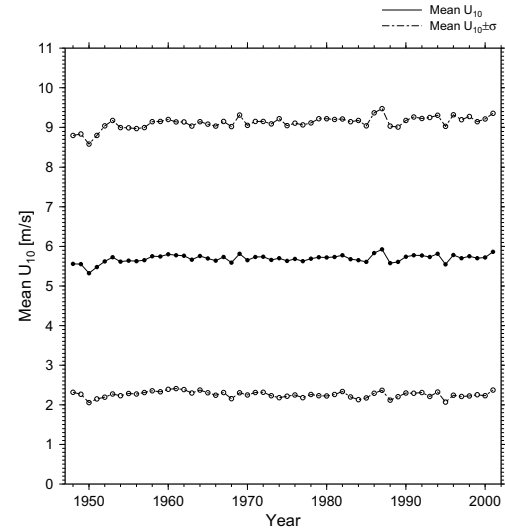


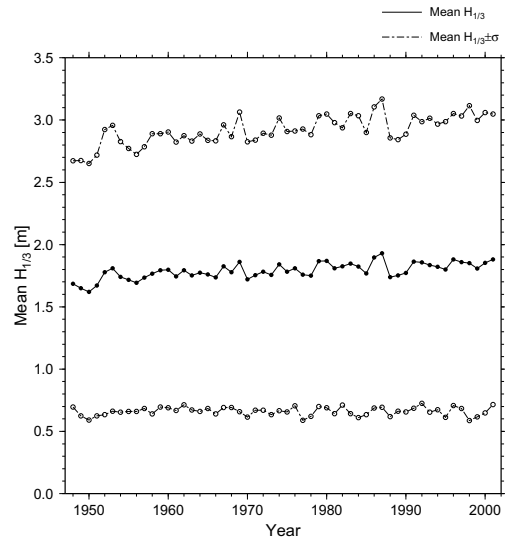
Fig. 2 Comparison of PDF of U_{10} and H_s with buoy data (Location 46035)

4. 波浪統計量の年変化と長期期間年平均値の分布

極値統計解析に移る前に、風速および有義波高の平均量の長期間変化と空間分布について調べる。Fig. 3 に示すのは、全計算領域における風速、有義波高の年平均値をプロットしたものである。図中の実線は平均値、一点鎖



(a) U_{10} [m/s]



(b) H_s [m]

Fig. 3 Annual change of averaged value

線は平均値 ± 標準偏差である。また Table 4 は、全計算領域および日本周辺（北緯 20 度～50 度、東経 120 度～160 度）の範囲における風速、有義波高および有義波周期の変化率を計算したものである。風速について見ると、1948 年～1952 年の期間で平均量の大きな変化が見られるが、1952 年以降においてはほぼ一定値が続いている。一方、年平均有義波高については、全計算領域および日本周辺ともに約 20cm/50year=0.4cm/year の波高の増加が見られる。図には示していないが、年平均有義波周期

Table 4 Avergaed annual rate of change

	Area	annual	summer	winter
$\langle U_{10} \rangle$ [m/s]	Pacific	0.0016	0.0009	0.0033
	Japan	0.0038	0.0022	0.0059
$\langle H_s \rangle$ [m]	Pacific	0.0023	0.0014	0.0047
	Japan	0.0023	0.0020	0.0025
$\langle T_s \rangle$ [s]	Pacific	0.0103	0.0008	0.0067
	Japan	0.0032	0.0037	0.0017

については、計算領域全体で約 $0.5\text{s}/50\text{year}=0.01\text{s}/\text{year}$ の周期の長期化が見られる。また、衛星データの同化の影響が現れる 1979 年において、平均量の変化は見られなかった。以上の結果、1952 年以降の波浪推算値については、対象とした北太平洋の領域において風速および波浪場の定常性が保たれていることがわかった。なお、有義波高の微増の理由については不明であり、今後の課題とする。

ついで、年平均量で定常性が保たれた 1952 年～2001 年（50 年間）を対象に、各計算格子点毎の 50 年間の風速および有義波高の平均値を Fig. 4 に示す。各格子点における 50 年間の平均風速および波高の分布より、太平洋における平均波高の分布と平均風速の分布の形状はほぼ一致しており、風速の強さが波高に大きく影響していることがわかる。さらに、偏西風が強い北緯 40 度から 50 度の緯度では平均風速も 8m/s 以上あり、その結果、平均有義波高も 3m 近い値となっている。但し、日本周辺に着目すると、太平洋側と比較して日本海側の平均風速は $1\sim 2\text{m/s}$ 弱く、これに対応して波高も 50cm 程低くなっている。

5. 波高の極値統計解析結果

本章では、北大西洋における波浪のハザードマップを作成するため、波浪推算値を用いて極値統計解析を行い、100 年確率波の推定を行う。

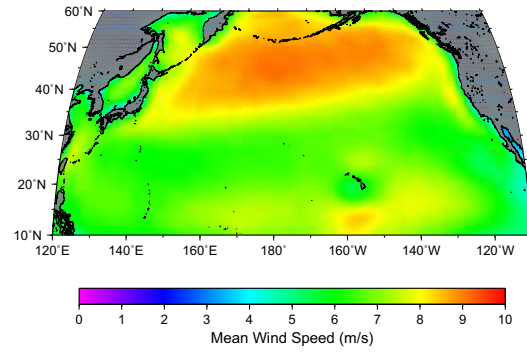
極値統計解析における最大値資料として各格子点における年最大有義波高を用い、最大値の確率分布は、Fisher and Tippett によって提案された極値 I 型～III 型分布を用いる。

極値 I 型分布

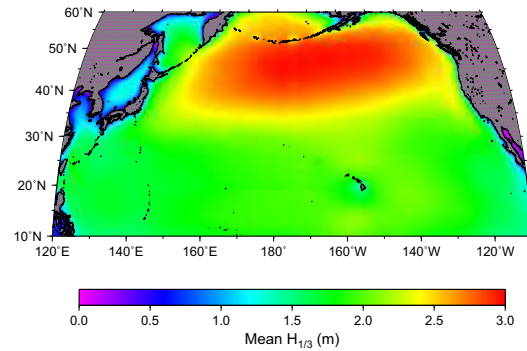
$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{x-B}{A} \right) \right\} \quad (3)$$

極値 II 型分布

$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(1 + \frac{x-B}{kA} \right)^{-k} \right\} \quad (4)$$



(a) U_{10} [m/s]



(b) H_s [m]

Fig. 4 Computed 50 years averaged wind and wave

極値 III 型分布

$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{x-B}{A} \right)^k \right\} \quad (5)$$

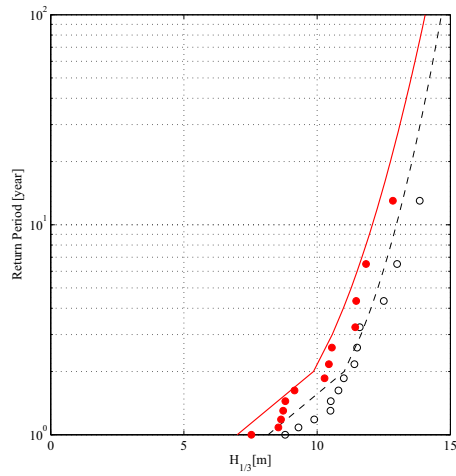
1 変数 Weibull 分布

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{x-B}{A} \right)^k \right\} \quad (6)$$

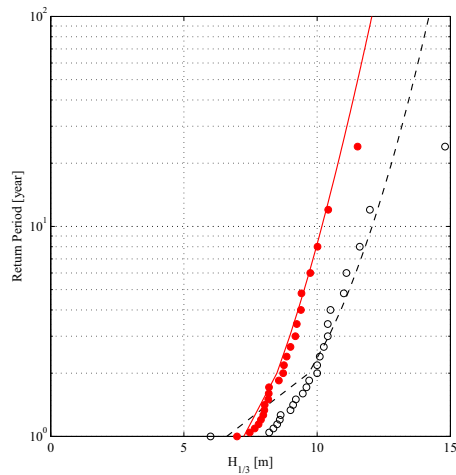
ここで、 A 、 B および k は分布関数の尺度母数、位置母数、形状母数と呼ばれる母数である。最大値資料を上記の 4 つの分布関数に当てはめ、もっとも適合度の高い分布を最適分布として採用する。母数推定には、最尤法を用いた。最尤法では、尤度関数 L

$$L = \prod F(x(m)|k, A, B) \quad (7)$$

が最大となるときの母数を最適値として採用する。ここで、 $x(m)$ は最大値資料を大きさにより並べ換えた順序統計量である。



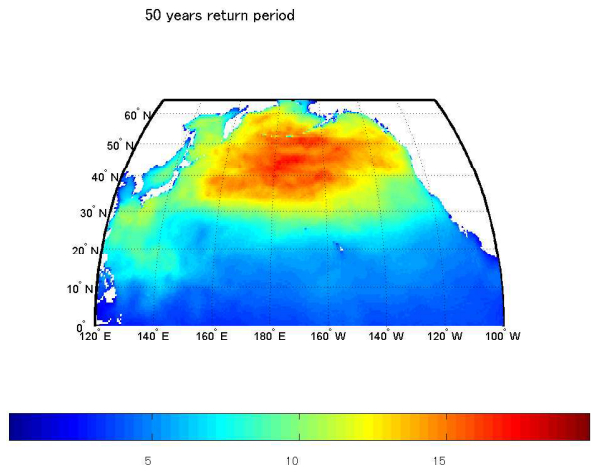
(a) Location 46035



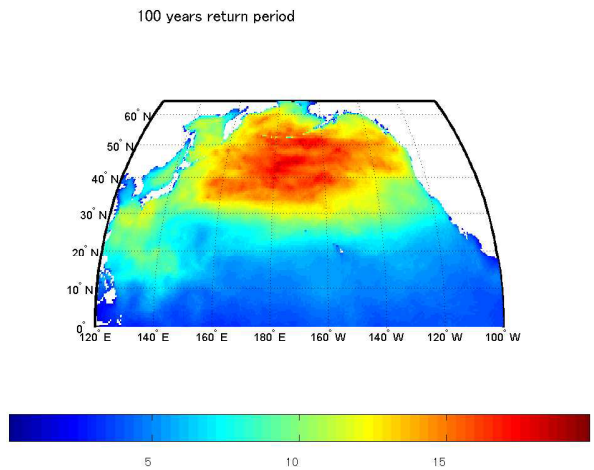
(b) Location 51001

Fig. 5 Comparison of Extreme distribution with observed data (○: Observed, ●: Computed)

Fig. 5 に示すのは、上記の手法により母数を推定した結果であり、推定された極値分布と推算値および観測値の関係である。図中の●および○は推算値および観測値であり、実線および破線は推算値および観測値から推定した極値分布である。測点 46035 について見ると、推算値と観測値から推定された極値分布は、位置は異なるもののほぼ相似形であることがわかる。一方測点 51001 では、推算値と観測値から推定された極値分布は再現期間が長くなるに従い差が大きくなっている。再現期間 10 年における推算値と観測値の極値分布の比を極値分布推定誤差 R_{10}^e と定義すると、全 15 観測点の極値分布推定誤差の平均値 $E[R_{10}^e] = 0.81$ であり偏差は 0.11 であった。先に行った線形回帰分析の結果では、有義波高の推算値



(a) 50 years wave



(b) 100 years wave

Fig. 6 Computed 500 and 1000 years wave in the North Pacific Ocean

と観測値の傾きは平均で 0.72 であった。極値統計解析の結果はこれより若干良い値となっているものの、推算値より推定された 10 年確率波高は観測値より約 2 割程度過小評価となることが分かった。

上記の結果を踏まえ、Fig. 6 に示すのは、北太平洋全域の各格子点において最尤法を用いて極値統計解析を行い、極値分布の母数を推定して求めた 50 年および 100 年確率波高の空間分布である。北太平洋全域における 50 年および 100 年確率波高の分布は、北緯 30 度以北において 15m を超える確率波高が広範囲に分布していることがわかる。また Fig. 4 で示した 50 年平均波高の分布と類似した分布になっているが、平均波高分布との大きな違い

は日本周辺の分布形状の違いである。日本周辺の確率波高の分布を見ると太平洋沿岸、特に沖縄、九州および四国沖の波高が10mを超えておりかなり高い。これは夏季に来襲する台風の影響であり、年平均すると冬季の静穏時と相殺されるため平均波高にはこれらの影響は見られなくなる。一方、日本海側は北陸および東北地方沿岸で波高が10mを超えており、こちらは冬季季節風の影響であると考えられる。50年確率波と100年確率波の分布の差はそれほど大きくなく、100年確率波の分布は50年確率波の分布を全体的にかさ上げたものに近い。

6. 結 論

以上本研究では、波浪推算モデルにWAMモデル、海上風にNCEP/NCAR再解析データを用いて北太平洋の長期波浪推算を行い、北太平洋および日本周辺の過去50年間の波浪の再現計算を行った。

まず始めに、波浪推算値とブイ観測値と比較を行った結果、NCEP/NCARの海上風データを用いて推算された波高と観測値の相関係数は0.72と風速とほぼ同程度であり、バイアスは0.2mと十分小さいものの、傾きは0.70前後と観測値より約30%低めに見積もられることがわかった。一方周期については、相関係数が0.6と波高よりも相関が低い上、バイアスも約2秒と大きく信頼度はそれほど高くないことがわかった。ついで、波高分布および極致統計分布の比較を行い、北太平洋における暴風時の波浪の分布特性について検討を行った。その結果、日本周辺の確率波高の分布は、太平洋沿岸では沖縄、九州および四国沖が、日本海側は北陸および東北地方沿岸で50~100年の確率波高が10mを超えることがわかった。

今回用いた波浪推算モデルは、スペクトル型波浪モデ

ルであり、得られる波高は平均エネルギーに相当する有義波高のみである。実際に波浪による被災事例が生じるのは、最大波もしくはこれに相当する波による。今後は、スペクトル型波浪モデルから最大波を推定するアルゴリズムを開発し、最大波高の推算を試みたい。

謝 辞： 本研究を行うにあたり、(株)電力計算センター 須賀康夫氏は大変お世話になった。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- Caires, S., A. Sterl, and C. Gommenginger (2005). Global ocean wave period data: Validation and description. *J. Geophys. Res.*, 110(C02003), 1–12.
- Cox, A. T. and V. R. Swail (2001). A global wave hindcast over the period 1958–1997. *J. Geophys. Res.*, 106(C2), 2313–2329.
- Graham, N. E. and H. F. Diaz (2001). Evidence for intensification of North Pacific winter cyclones since 1948. *Bulletin of American Meteorological Society* 82(9), 1869–1893.
- Swail, V. R. and A. T. Cox (2000). On the use of NCEP-NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology* 17, 532–545.
- WAMDI-Group (1988). The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal Physical Oceanography* 18, 1775–1810.

Wave Climate Analysis of North Pacific Ocean based on NCEP/NCAR Reanalysis Data

Nobuhito MORI, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

Synopsis

The study carries out 50 years' wave simulation in North Pacific using the NCEP/NCAR reanalysis surface wind fields and investigates wave climates. The reanalysis wind fields are applied to the third generation wave model. The numerical results are compared with observed wind and wave data to verify the model performance. The comparison with buoy data gives good agreement with the means, biases, scatters and probability distributions. A long-term trend of wave climate shows statistically significant increase of wave heights and periods at the Northern Pacific Ocean. The extreme wave statistics gives 50 and 100 years extreme wave heights and may contribute a first guess of extreme wave heights in this area.

Keywords: wave hindcast, wind wave, wave statistics, extreme statistics, wave climate