

内湾・内海における観測資料を用いた確率風速と確率波高の推定

Estimating Return Values of Wind Speed and Wave Height by Using Their Data Set Acquired at Measurement Stations in Inner Bay Areas and the Inland Sea of Japan

山口正隆*・大福 学**・野中浩一**・畑田佳男*

Masataka YAMAGUCHI*, Manabu OHFUKU**, Hirokazu NONAKA** and Yoshio HATADA*

Using the long term measurement data of sea wind speed and wave height acquired at many stations in Tokyo Bay, Sagami Bay, Ise Bay and the Seto Inland Sea including Osaka Bay, data sets of their annual maximum(AM) values and peaks-over-threshold(POT) values are made. An analysis detects hardly any substantial trend with a statistical significance in each of the data sets. Least-squares-based extreme value analyses are applied to both AM and POT data sets of wind speed and those of wave height. A 50-year return wind speed at 10 m height indicates around 30 m/s at most of the stations and becomes greater at the stations in the western area of the Inland Sea due to frequent passage of intense typhoons. A 50-year return wave height is location-dependent, which ranges from 3.5 to 5 m in local waves-dominated areas. In this connection, it reaches 3.6 m at Tokyo Bay Station and 5 m at a station in the southwestern area of the Inland Sea.

Key Words : return values, measurements, wind speed, wave height, inland sea, inner bay

1. 緒 言

わが国の産業や人口、資産が集中している東京湾から伊勢湾を経て大阪湾を含む瀬戸内海に至る内湾・内海において、風速や波高の最大規模が50年単位でみてどの程度に達するかを観測資料の解析に基づいて適切に推定することは安心安全な産業・生活基盤を確保・構築していくうえで重要な課題の1つである。しかし、これに係わる従来の研究事例はほとんど見当たらず、異常風速や異常波高の観測記録が気象協会から逐年的に発行された気象海象要覧^{[1]~[4]}に掲載されているにすぎない。これに対して、山口ら^{[5], [6]}および日野ら^[7]はわが国の内湾・内海における波浪の長期推算システムを構築する研究の過程で、そこに位置する多くの観測地点における長期の海上風および波浪の観測資料を収集している。

そこで本研究では、これらの資料を整理・解析することによって、内湾・内海の観測地点における風速および波高の50年確率値とその信頼区間を推定し、それらの特性を考察する。本研究は東京湾から瀬戸内海西部海域に至る内湾・内海において50年スケールで風速や波高の最大規模がどの程度をとりうるかという素朴な疑問に答えるものである。

*愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

**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

原稿受理 平成20年9月10日

2. 風速および波高の極値資料とその統計解析の方法

2.1 極値資料の作成と傾向変動の解析

極値統計解析に用いる資料として、年最大値 (AM) 資料および極大値 (POT) 資料を作成する。すなわち、風速および波高の1~2時間間隔値資料から基準値を上まわるストーム時のピーク値のうち、その生起時間間隔が72時間以上のものを独立したPOT資料として抽出したのち、これからAM資料を作成する。風速および波高の基準値は観測地点ごとに変化する。

つぎに、AM資料において一方向的な増加または減少傾向、すなわち傾向変動の有無を調べる。傾向変動の解析には、AM資料にあてはめた直線の勾配値が0という仮説に対する t 分布の理論に基づく検定法、およびAM資料より得た鈴木^[8]のトレンド示数 I_t に基づく検定法を適用する。有意水準5% (信頼度95%)の片側検定でAM資料に統計的に有意な増加または減少傾向が認められる場合、 t 検定ではそれぞれ $L=1$ 、 $L=-1$ とおく。トレンド示数検定では $I_t > 1.65$ が増加傾向、 $I_t < -1.65$ が減少傾向を表す。傾向変動が認められない場合、 $L=0$ とし、トレンド示数は $|I_t| < 1.65$ に相当する。

Fig. 1は検討対象とする海上風観測地点 (○印) と波浪観測地点 (●印) および海上風・波浪の同時観測地点 (◎印) の位置を東京湾から駿河湾に至る関東沿岸海域、伊勢湾、大阪湾を含む瀬戸内海の3海域において示す。風観測地点の大部分は海上部に位置するが、このほか長期の資料が得られている沿岸観測地点として、瀬戸内海播磨灘の江井ヶ島、瀬戸内海西部海域に位置する佐田岬半島の九町越と佐田岬灯台の3地点を加えている。上記3ヶ所の準海上風観測地点を含めた海上風観測地点の数は19で資料年数は10~35年、波浪観測地点の数は20で資料年数は10~36年となっている。地域別には、海上風・準海上風および波浪の観測地点数は関東沿岸海域でそれぞれ3と6、伊勢湾で4と4、大阪湾・紀伊水道で6と4、それ以外の瀬戸内海で6と6である。

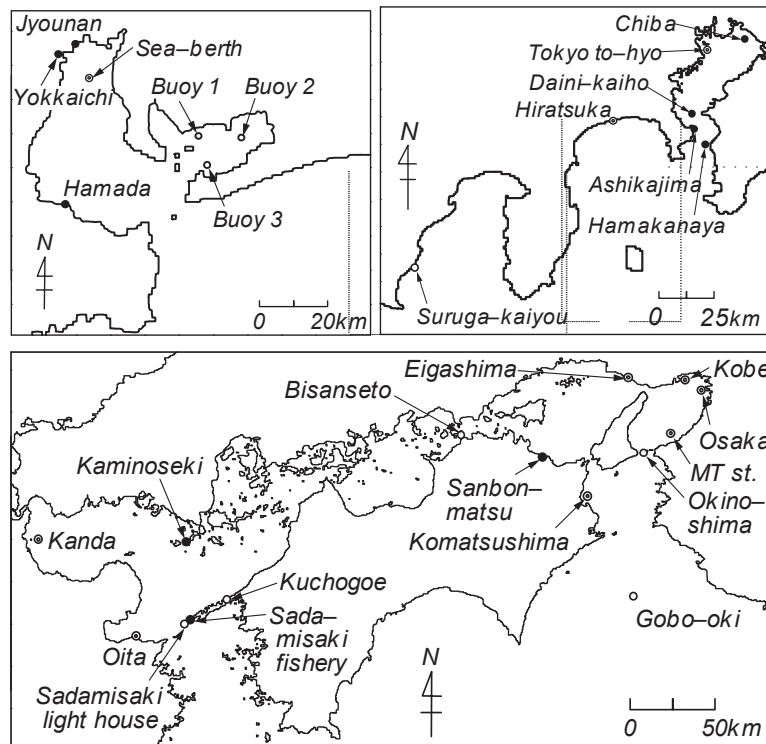


Fig. 1 Location of measurement stations of winds and waves.

2.2 極値統計解析モデル

極値統計解析には、候補分布を Gumbel 分布、0.5~10 の間の 27 種類の形状母数 k をもつ Weibull 分布、2.5~40 の間の 20 種類の形状母数 k をもつ FT-II 型分布の 48 種類とし、標本資料値への非超過確率の割当てを合田^[9]のプロットング公式、尺度母数と位置母数の推定を最小 2 乗法、最適分布の選択を相関係数最大基準、再現確率値の分散値の推定を jackknife 法に基づく Yamaguchi・Hatada^[10]のモデルを適用する。対象とする極値資料は (10 分間平均) 風速および (有義) 波高に対する AM 資料と POT 資料である。POT 資料に対する解析では、標本資料数 N を資料年数 K (年) の 3~10 倍、資料総数 N_T を $N_T=N$ とする。

3. 風観測資料および確率風速の推定結果

3.1 風観測資料

確率風速の推定値を観測地点間で比較するために、極値統計解析にあたり観測風速に 1/7 乗則を適用して変換した 10m 高度風速 U_{10} を用いる。解析に使用する風観測資料の取得地点は Fig. 1 に位置を示した 19 地点である。資料年数は 10~35 年と幅広い。このうち、資料年数が 20 年以上ではほぼ欠測を伴わない連続した資料が得られる地点とそこでの資料年数は、海上部にある東京湾湾奥の東京灯標 (35 年)、相模湾湾奥の平塚 (26 年)、伊勢湾北部のシーバース (28 年)、大阪湾南東部の MT 局 (28 年)、別府湾の大分 (20 年) および播磨灘沿岸部の江井ヶ島 (34 年) と佐田岬半島に位置する九町越 (31 年) や佐田岬灯台 (33 年) である。MT 局はその位置を数 km の範囲で 3 回変えているが、風速計の高度はほぼ同一であるので、資料の等質性はそれほど問題にならない。また江井ヶ島では、定時観測資料を入手した年数は 1983~2005 年の 23 年であり、1972~1982 年の 11 年間については期間最大風速を記載した紙資料より年最大風速資料のみを抽出している。このほか、小松島で 1984~1986 年の 3 年間、大阪で 1989~1992 年の 4 年間、神戸で 1991~1992 年の 2 年間、荻田で 1996 年の 1 年間、御坊沖で 1987 年の 1 年間、それぞれ資料を欠いている。また、佐田岬灯台では 1953~1985 年を資料期間としており、他の地点のものと大きく異なる。解析においては、いずれの地点でも資料年数 K を資料の有無にかかわらず観測資料の期間長とする。したがって、欠測年を伴う AM 資料では、資料数 $N <$ 資料年数 K となる。

3.2 傾向変動

Fig. 2 は 10m 高度に換算した年最大風速 U_{yp} の年別変化を東京灯標と MT 局の 2 地点について示す。年最大風速はいずれの地点でも特定の年、たとえば東京灯標では 1979 年 (台風 7920 号時) と 1985 年 (台風 8506 号時) にピーク値をとりながら、全体として年とともに漸増する傾向にあるようにみえる。Table 1 は上記 2 地点に平塚、シーバース、江井ヶ島、九町越を加えた 6 地点における年最大風速資料に対する有意水準 5% の片側検定による傾向変動解析の結果の一覧を示す。表中の a_U は年最大風速資料の勾配値、 Δa_U

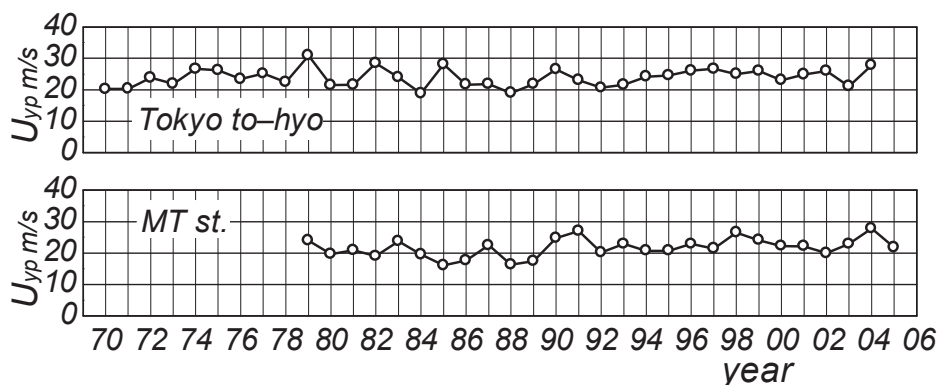


Fig. 2 Yearly variation of annual maximum wind speed.

は有意水準 5%での t 検定における勾配値 a_U の変動範囲, L は t 検定指標, I_t はトレンド示数を表す。これによると, 勾配値はいずれの地点でも正の値をとるが, 有意水準 5%で統計的に有意な傾向変動が存在するとみなされる地点は MT 局と江井ヶ島である。両地点における増加傾向はそれほど顕著でないが, 勾配値 a_U の変動範囲 Δa_U が示すように, 江井ヶ島におけるものがやや強い。しかし以下の極値統計解析では, 極値資料に含まれる傾向変動の影響を補正せずにそのまま使用する。

Table 1 Trend analysis for annual maximum wind speed data.

location	K yrs.	a_U cm/s/year	Δa_U cm/s/year	L	I_t
Tokyo to-hyo	35	4.60	8.14	0	1.24
Hiratsuka	26	2.43	10.73	0	0.20
Sea-berth	28	6.84	11.08	0	1.58
MT st.	27	14.47	12.05	1	1.77
Eigashima	34	14.51	10.56	1	2.24
Kuchogoe	31	15.71	15.73	0	1.41

3.3 確率風速

Fig. 3 は年最大風速 (AM) 資料および極大風速 (POT) 資料に対する極値統計解析から得た最適分布に基づく Q-Q プロットを東京灯標について示す。図中には, 最適分布の形状母数 k や相関係数 ρ を与える。図の状況や相関係数が示すように, Q-Q プロット図において観測値と最適分布に基づく計算値で与えられる各資料点が 45° 直線上にほぼ分布する。

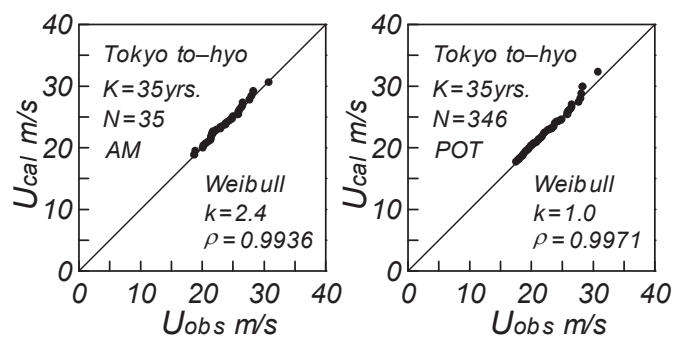


Fig. 3 Q-Q plot of annual maximum wind speed data and that of peaks-over-threshold wind speed data.

Table 2 は AM 資料および POT 資料に対する極値統計解析結果の一覧を資料年数が 20 年を越える東京灯標から瀬戸内海西部海域の佐田岬灯台までの 12 地点について示す。各地点の結果の第 1 行目および第 2 行目がそれぞれ AM 資料と POT 資料に基づく結果に対応する。表の各欄は地点名, 風速計高度 z (m), 観測資料の始まりの年 YS (19〇〇年の 19 を省略) と終わりの年 YE (20〇〇年の 20 または 19〇〇年の 19 を省略), 資料年数 K , 資料数 N , 資料総数 N_T , 第 1 位風速 U_{\max} , 第 2 位風速 $U_{(2)}$, 最適分布 (Weibull 分布, FT-II 型分布に対してそれぞれ W , F と表記) とその形状母数 k , 相関係数 ρ , 50 年確率風速 U_{50} (m/s) とその標準偏差 $U_{\sigma 50}$ (m/s), 比 $U_{\sigma 50}/U_{50}$ の % 値で与えられる変動係数 CV を表す。資料年数は 20~35 年, 海上風観測地点が 9 地点, 準海上風観測地点が江井ヶ島の 1 地点, その他が周囲を海に開いた山上にある九町越と佐田岬先端に位置する佐田岬灯台の 2 地点である。

代表地点の 1 つである東京灯標においては, 資料年数は 35 年と全対象地点の中で最も長い。AM 資料に対して第 1 位値 U_{\max} は 30.9m/s, 第 2 位値 $U_{(2)}$ は 28.4m/s, その差は 2.5m/s である。最適分布は形状母数 2.4 の Weibull 分布で相関係数 ρ は 0.9936 とその適合度はかなり高い。50 年確率風速 U_{50} とその標準偏差 $U_{\sigma 50}$ は 30.3 ± 1.0 m/s, 変動係数 CV は 3.3% であるから, 信頼区間の幅は狭い。一方, POT 資料に対して年平均発生数 λ ($=N/K$) は約 10, 資料採択率 ν ($=N/N_T$) は 1 としている。第 1 位値 U_{\max} は 30.9m/s, 第 2 位値 $U_{(2)}$ は 28.4m/s であり, この場合の第 2 位値は AM 資料の第 2 位値と一致する。もちろん POT 資料の第 2 位値が AM 資料の第 2 位値より大きい地点もある。最適分布は形状母数 $k=1.0$ の Weibull 分布, 相関係数 ρ は 0.9971 であり, その適合度は非常に高い。50 年確率風速 U_{50} とその標準偏差 $U_{\sigma 50}$ は 31.6 ± 0.8 m/s, 変動係数 CV は 2.7% であり, AM 資料による結果より 50 年確率風速が 1.3m/s 大きく, 標準偏差が 0.2m/s, 変動係数が 0.6% 小さい。

もう 1 つの代表地点である MT 局においても, 数値は当然異なるけれども, POT 資料と AM 資料に基づ

Table 2 A list of 50-year return wind speed and its standard deviation estimated at each measurement station.

station	z m	YS	YE	K yrs.	N	N_T	U_{max} m/s	$U_{(2)}$ m/s	k	ρ	U_{50} m/s	$U_{\sigma 50}$ m/s	CV %
Tokyo to-hyo	24	70	04	35	35	35	30.9	28.4	W2.4	0.9936	30.3	1.0	3.3
	24	70	04	35	346	346	30.9	28.4	W1.0	0.9971	31.6	0.8	2.7
Hiratsuka	23	80	05	26	26	26	26.0	25.7	W2.0	0.9766	27.4	0.8	2.8
	23	80	05	26	122	122	26.0	25.7	W1.1	0.9916	27.6	0.8	3.0
Sea-berth	37	76	03	28	28	28	26.5	24.9	W1.2	0.9892	26.9	1.8	6.7
	37	76	03	28	100	100	26.5	26.5	W0.8	0.9866	28.0	1.7	6.1
Komatsushima	15.4	82	06	25	22	25	29.7	29.5	W5.0	0.9779	31.0	1.1	3.6
	15.4	82	06	25	50	50	29.7	29.5	W1.6	0.9837	31.9	1.1	3.5
MT st.	17	79	05	27	27	27	27.8	27.0	W3.0	0.9930	28.1	1.1	3.8
	17	79	05	27	141	141	27.8	27.0	W1.2	0.9952	29.5	1.0	3.3
Osaka	13.2	81	05	25	21	25	27.5	25.9	W1.3	0.9858	28.3	2.0	7.0
	13.2	81	05	25	171	171	27.5	25.9	W0.9	0.9959	28.7	1.4	4.9
Kobe	14	82	05	24	22	24	25.4	24.1	W1.9	0.9920	26.0	1.4	5.3
	14	82	05	24	156	156	25.4	24.1	W1.1	0.9946	27.3	1.0	3.6
Eigashima	13	72	05	34	34	34	28.0	25.6	W2.6	0.9840	27.7	1.4	4.9
	13	83	05	23	136	136	28.0	27.1	W0.8	0.9894	29.7	2.0	6.8
Kanda	11	81	06	26	25	26	32.6	28.8	W1.0	0.9798	33.4	3.3	10.0
	11	81	06	26	180	180	32.6	28.8	W0.8	0.9935	32.6	2.4	7.2
Oita	15.8	87	06	20	20	20	29.8	28.6	W2.4	0.9901	31.7	1.9	5.9
	15.8	87	06	20	284	284	29.8	28.6	F5.0	0.9907	33.5	1.7	5.1
Kuchogoe	216	76	06	31	31	31	32.6	31.1	W1.7	0.9864	32.5	2.3	7.0
	216	76	06	31	261	261	32.6	31.1	W0.7	0.9900	34.5	2.3	6.6
Sadamisaki	40.6	53	85	33	33	33	40.9	40.6	W2.0	0.9914	42.8	2.0	4.6
	40.6	53	85	33	66	294	40.9	40.6	W1.7	0.9906	42.7	2.0	4.7

く結果について東京灯標でみられた特徴がうかがえる。すなわち、POT 資料に基づく結果が AM 資料に基づく結果に比べて正側に裾をより長く引く最適分布の形状をとるとともに、最適分布のより高い適合度を与える。また、POT 資料に基づく確率風速は AM 資料に基づくものより若干大きい。これらの特徴は各観測地点でほぼ共通してみられる。要するに、POT 資料に基づく極値統計解析が AM 資料に基づくものより高精度の確率風速の推定値を与える傾向にある。ただし、荇田および佐田岬灯台では AM 資料に基づく確率風速が POT 資料に基づくものより若干大きいし、江井ヶ島では POT 資料に基づく確率風速の標準偏差が AM 資料に基づくものよりやや大きい。江井ヶ島では AM 資料の年数が POT 資料の年数よりかなり多いことにその理由がある。

Fig. 4 は POT 資料に基づいて推定した 50 年確率風速 U_{50} と標準偏差 $U_{\sigma 50}$ を資料年数 K とともに東京灯標から佐田岬灯台に至る 19 地点について示す。ただし、資料年数が 20 年以上の地点を□印、14~19 年の地点を○印、10~13 年の地点を△印で記して、結果を区別する。資料年数は 10~35 年と非常に幅広く分布するので、推定値の信頼性を考慮に入れて、資料年数が 20 年以上の 12 地点を主な検討対象地点とする。江井ヶ島では資料年数の多い AM 資料に基づく結果を用いる。海峡部の地形による風の収束効果を受けて風速が増強される佐田岬灯台では、50 年確率風速も約 43m/s と他の地点より圧倒的に大きい。佐田岬灯台以外の地点では、50 年確率風速は 27~35m/s の範囲に分布し、多くの地点で 30m/s 前後の値をとる。確率風速が 27~30m/s の地点は平塚 (27.6m/s)、シーバース (28.0m/s)、MT 局 (29.5m/s)、大阪 (28.7m/s)、神戸 (27.3m/s)、江井ヶ島 (29.7m/s)、30~35m/s の地点は東京灯標 (31.6m/s)、小松島 (31.9m/s)、荇田 (32.6m/s)、大分 (33.5m/s)、九町越 (34.5m/s) である。確率風速は荇田、大分、九町越が位置する瀬戸内海西部海域で相対的に大きい、同時に標準偏差も同様の特性をもつ。これは瀬戸内海西部海域の地理的状況による

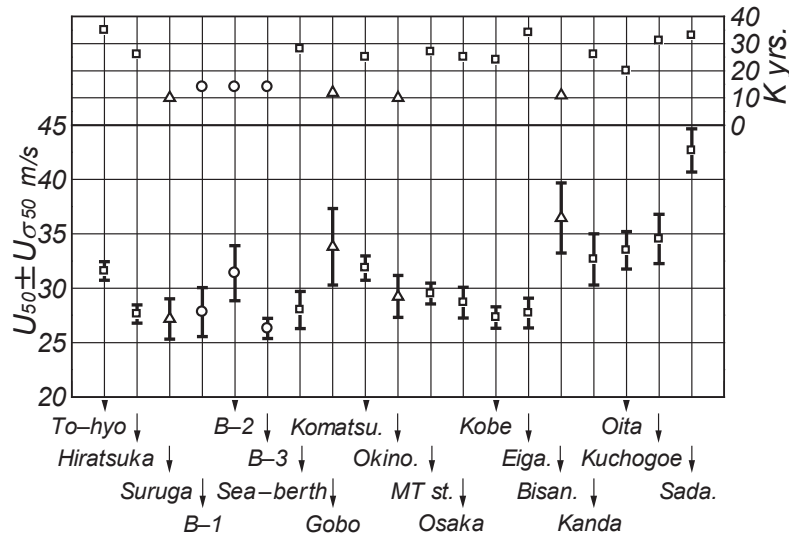


Fig. 4 50-year return wind speed and its standard deviation estimated at each measurement station.

ものであり、とくに近年における大型台風の接近・通過に伴う異常強風の出現頻度の増大に負うところが大きい。また大阪湾内では、50年確率風速は30m/s以下であるのに対して、紀伊水道北部の小松島では30m/sを越えて、内湾部よりやや大きい。全19地点で見ると、50年確率風速の範囲は26~37m/sに拡大するとともに、標準偏差および変動係数も増加し、推定値の統計的な信頼性が低下する。この中で、三河湾に位置するブイ1、ブイ2、ブイ3では狭い海域にもかかわらず、50年確率風速が5m/sの差をもつという特徴や、島嶼間を繋ぐ備讃瀬戸大橋では地形による風の収束効果のために、50年確率風速とその標準偏差が36.5±3.2m/sをとり、他の地点における値より大きいという特徴が指摘される。

以上の検討結果をまとめると、東京湾から瀬戸内海までの観測地点における50年確率風速は局所地形の影響を強く受ける佐田岬灯台などの海峡部を除けば、各観測地点の地理的状況に応じて27~35m/sの範囲で変化し、30m/s前後の値をとる地点が多いことや、瀬戸内海西部海域で50年確率風速が相対的に大きいことが言えよう。

4. 波浪観測資料および確率波高の推定結果

4.1 波浪観測資料

解析に使用する波浪観測資料の取得地点はFig. 1に位置を与えた20地点である。資料年数は10~36年と広範に分布する。資料年数が20年以上の地点とそこでの資料年数は東京灯標(36年)、平塚(27年)、伊勢湾の四日市(20年)、シーバース(26年)、小松島(32年)、MT局(28年)、大阪(25年)、神戸(31年)、江井ヶ島(34年)、荻田(27年)、大分(20年)および佐田岬漁港(29年)の12地点、15~19年の地点は第2海堡(18年)、浜金谷(17年)、三本松(15年)の3地点、10~14年の地点は千葉(10年)、アシカ島(14年)、城南(10年)、浜田(10年)、上関(12年)の5地点となっている。資料年数が20年以上の12地点を主な検討対象地点とする。波浪観測資料は異常波浪時に欠測や不適切な値を伴うことも少なくないので、年最大波高資料や極大波高資料を欠落のない資料とすることは容易でない。ここでは種々の方策をめぐらせて、できるだけ長い期間で欠落のない極値資料を整備するようにした。この状況を資料年数が20年以上の地点について述べれば、つぎのようである。

①東京灯標においては、1969~1982年の年最大波高資料を気象海象要覧^[1]から採録し、1983~2004年の時系列資料と併せて1969~2004年の36年間の年最大波高資料とする。一方、極大波高資料は1983~2004年

の22年間の時系列資料から作成する。欠測はほとんどみられない。高い測得率は平塚，四日市，シーバース，MT局，大分で得られている。

②小松島においては，1974～1993年の年最大波高資料を気象海象要覧^[2]から採録し，1997～2005年の9年間の年最大波高資料および極大波高資料を時系列資料から作成する。したがって，年最大波高資料は1974～2005年の32年を資料期間長とするが，1994～1996年の3年相当分を欠いている。極大波高資料の年数は9年にすぎない。

③MT局はその位置を数km以内の範囲で3回変えており，水深も多少変化しているが，この影響を無視して等質な波高資料とみなす。

④大阪においては，観測資料の期間長を1981～2005年の25年とするが，1989～1992年の4年相当分を欠く。神戸においては1975～2005年の資料期間長31年のうち1992年と2001年の2年相当分を，荻田においては1980～2006年の資料期間長27年のうち1996年の1年相当分を欠損している。また，1973～2001年の29年を資料期間長とする佐田岬漁港においては，1977年，1989年，1996～1998年の計5年間相当分を欠いており，しかも観測資料が得られている期間においても多くの欠測を含む。しかし，年最大波高資料および極大波高資料を用いた解析では資料期間をそのまま資料年数 K とみなして，欠損部に対する補正を考慮しない。

⑤江井ヶ島においては，1972～1991年の20年間に対して紙資料から年最大波高資料を，1992～2005年の14年間に対して時系列資料から年最大波高資料および極大波高資料を抽出している。したがって，年最大波高資料の年数は34年になるが，1976～1977年と1981年の3年相当分を欠く。極大波高資料の年数は14年である。

このほか，伊勢湾湾奥の城南で1999年の1年相当分を欠く。また津田，三本松，引田では，3地点が近接し，しかも観測期間がほとんど重複しないことから，3地点の観測資料を合体し資料年数を1991～2005年の15年として年最大波高資料および極大波高資料を作成している。この場合でも1994～1996年の3年相当分の資料を欠く。

4.2 傾向変動

Fig. 5は年最大波高 H_{yp} の年別変化を高品質な観測資料が得られている東京灯標とMT局について示す。これらは主に台風に伴う異常波高の生起を反映した年別の変化を与えるだけで，格別取りあげるべき挙動を示さない。Table 3は年最大波高資料に対する有意水準5%での片側検定に基づく傾向変動の解析結果を資料年数が26～36年にわたる東京灯標など8地点について示す。ここに， a_H は年最大波高資料の勾配値， Δa_H は有意水準5%での t 検定における勾配値 a_H の変動範囲を表す。東京灯標，平塚，シーバース，MT局の4地点では t 検定の L 指標やトレンド示数 I_t が示すように，統計的に有意な傾向変動は検出されない。

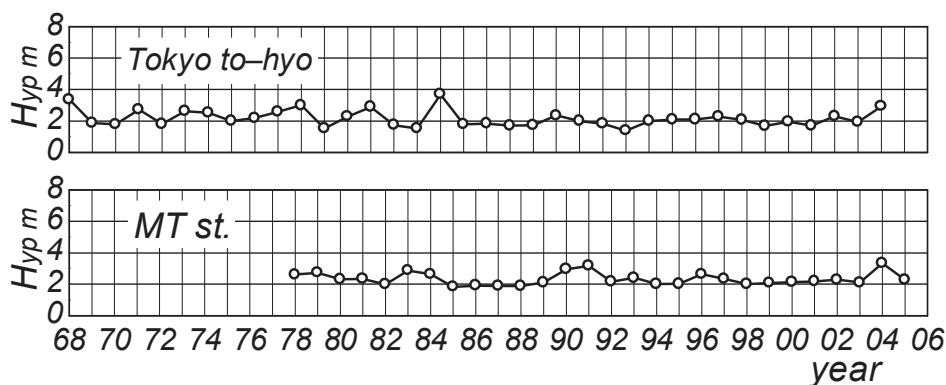


Fig. 5 Yearly variation of annual maximum wave height.

これは2年間相当分の欠測を含む神戸でも同様である。一方、波高観測資料の質に問題をもつ小松島、江井ヶ島、荻田ではいずれかの検定指標によって弱い増加傾向の存在が示唆される。しかし、波高の極値資料に対する統計解析では、風速の極値資料の場合と同様に、傾向変動の存在可能性を無視する。

4.3 確率波高

Fig. 6は年最大波高 (AM) 資料および極大波高 (POT) 資料に対する極値統計解析より得た最適分布に基づく計算値と観測値のQ-QプロットをMT局について示す。当該地点では、AM資料およびPOT資料に対するそれぞれの最適分布の適合度がかかなり高く、個々の観測値と計算値は直線関係をほぼ保つ。

Table 4はAM資料およびPOT資料に対する極値統計解析結果の一覧を資料年数が20年以上の地点、すなわち東京灯標、平塚、シーバース、MT局、荻田などの

12地点について示す。各地点の結果に相当する2行分のうち、第1行目はAM資料に基づく結果、第2行目はPOT資料に基づく結果を表す。代表地点としてまず東京灯標の結果をみると、AM資料の年数がPOT資料の年数より50%以上多いことから、AM資料の場合の相関係数が $\rho=0.9960$ となつて、POT資料の場合の $\rho=0.9888$ より1に近い値をとり、AM資料の場合の最適分布の適合度がかかなり高いことが示唆される。最適分布は、AM資料の場合形状母数 $k=1.3$ のWeibull分布、POT資料の場合形状母数 $k=5.0$ のFT-II型分布をとり、POT資料の場合に正側により長く分布の裾を引く。50年確率波高 H_{50} とその標準偏差 $H_{\sigma 50}$ および変動係数 CV はAM資料の場合 $3.63 \pm 0.29\text{m}$ と7.9%、POT資料の場合 $3.59 \pm 0.36\text{m}$ と10.0%であるから、50年確率波高は両資料の結果において同程度である一方、その標準偏差と変動係数はAM資料の場合に小さい。つまり、東京灯標ではAM資料の年数が多いことから、AM資料に対する最適分布の適合度が高く50年確率波高もPOT資料に基づく結果より有効な推定量になっている。AM資料の年数(34年)がPOT資料の年数(14年)より2倍以上多い江井ヶ島においても、POT資料と比べてAM資料の場合に最適分布のより高い適合度と、より有効な50年確率波高の推定値を生じる。ただし、50年確率波高の値はAM資料の場合に0.5m小さいという結果は、資料期間が長いAM資料においても第1位波高が変わらないことから、予め予想される。

他の地点では、POT資料に対する最適分布がAM資料に対する最適分布より正側に長く裾を引く形状をとること、最適分布に対する相関係数はMT局、シーバース、大分の3地点を除いてAM資料と比べて資料数の多いPOT資料の場合に大きいこと、POT資料とAM資料に基づく50年確率波高の推定値はあまり相違しないこと、POT資料に基づく50年確率波高の標準偏差はAM資料に基づく結果に比べて小さい値をとり、より有効な推定値になっていることが確認される。

Table 3 Trend analysis for annual maximum wave height data.

location	K yrs.	a_H cm/year	Δa_H cm/year	L	I_t
Tokyo to-hyo	36	-1.18	1.42	0	-0.98
Hiratsuka	27	2.15	4.05	0	0.81
Sea-berth	26	-0.30	2.58	0	0.20
Komatsushima	32	1.95	2.67	0	1.66
MT st.	28	-0.17	1.62	0	0.12
Kobe	31	1.51	2.06	0	0.53
Eigashima	34	2.51	1.77	1	1.68
Kanda	27	3.48	2.39	1	1.26

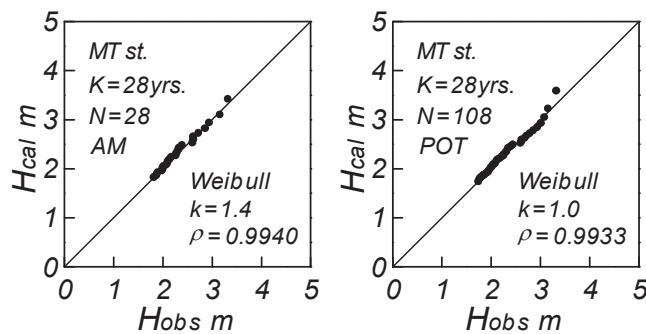


Fig. 6 Q-Q plot of annual maximum wave height data and that of peaks-over-threshold wave height data.

Table 4 A list of 50-year return wave height and its standard deviation estimated at each measurement station.

station	YS	YE	K yrs.	N	N_T	H_{max} m	$H_{(2)}$ m	k	ρ	H_{50} m	$H_{\sigma 50}$ m	CV %
Tokyo to-hyo	69	04	36	36	36	3.69	2.93	W1.3	0.9960	3.63	0.29	7.9
	83	04	22	129	129	3.69	2.93	F5.0	0.9888	3.59	0.36	10.0
Hiratsuka	79	05	27	27	27	6.60	6.14	W1.8	0.9831	6.86	0.43	6.3
	79	05	27	152	152	6.60	6.14	W1.1	0.9943	6.93	0.38	5.5
Yokkaichi	77	96	20	20	20	3.75	2.49	F12.5	0.9752	3.70	0.64	17.3
	77	96	20	208	208	3.75	2.49	W0.9	0.9934	3.43	0.31	8.9
Sea-berth	78	03	26	26	26	3.00	2.60	W2.0	0.9863	3.15	0.22	6.9
	78	03	26	52	52	3.00	2.60	W1.2	0.9726	3.19	0.22	6.7
Komatsushima	74	05	32	29	32	5.00	4.22	W1.3	0.9965	4.86	0.51	10.5
	97	05	9	62	62	4.22	3.98	W1.1	0.9945	5.16	0.43	8.3
MT st.	78	05	28	28	28	3.33	3.17	W1.4	0.9940	3.41	0.22	6.4
	78	05	28	108	108	3.33	3.17	W1.0	0.9933	3.56	0.18	5.0
Osaka	81	05	25	21	25	3.93	3.65	W2.0	0.9899	4.04	0.30	7.5
	81	05	25	132	132	3.93	3.65	W1.0	0.9955	4.00	0.23	5.8
Kobe	75	05	31	29	31	3.77	3.55	W1.7	0.9873	3.83	0.30	7.8
	75	05	31	143	143	3.77	3.55	W1.0	0.9933	3.88	0.24	6.1
Eigashima	72	05	34	31	34	3.94	3.16	W9.0	0.9936	3.71	0.46	12.4
	92	05	14	74	74	3.94	2.79	W0.75	0.9879	4.19	0.61	14.5
Kanda	80	06	27	26	27	3.76	3.64	W1.1	0.9677	4.04	0.40	9.8
	80	06	27	96	96	3.76	3.64	W0.9	0.9857	4.02	0.34	8.4
Oita	87	06	20	20	20	5.02	4.03	F5.0	0.9975	5.18	0.87	16.8
	87	06	20	111	111	5.02	4.03	W0.7	0.9961	5.03	0.66	13.1
Sadamisaki	73	01	29	24	29	7.28	6.68	W1.6	0.9844	7.66	0.79	10.3
	73	01	29	132	132	7.28	6.68	W0.8	0.9906	7.61	0.75	9.8

Fig. 7 は POT 資料に基づく 50 年確率波高 H_{50} とその標準偏差 $H_{\sigma 50}$ および資料年数 K を東京灯標から佐田岬漁港に至る 20 地点について示す。ただし、東京灯標、小松島、江井ヶ島の 3 地点では資料年数が多い AM 資料に基づく結果を与える。図では資料年数が 20 年以上の地点を□印で、15~19 年の地点を○印で、10~14 年の地点を△印で記している。資料年数が 20 年以上の 12 地点を順にみると、50 年確率波高は東京灯標で 3.6m、平塚で 6.9m、シーバースで 3.2m、四日市で 3.4m、小松島で 4.9m、MT 局で 3.6m、神戸で 3.9m、大阪で 4m、江井ヶ島で 3.7m、荻田で 4m、大分で 5m、佐田岬漁港で 7.6m と評価されている。ただし、佐田岬漁港における資料は欠測のため波高ピーク値を必ずしも適切に記録していないことから、確率波高は過小評価されている可能性が高い。資料年数が 20 年未満の 8 地点を含めて 50 年確率波高の特性を海域別にみると、狭義の東京湾口にあたる第 2 海堡で 2.3m と小さく、湾奥の千葉で 3m、東京灯標で 3.6m と大きい、これは、第 2 海堡の波浪観測地点が第 2 海堡の南側に位置するにもかかわらず外洋波浪の影響をほとんど受けないことや湾奥では湾内発生波浪の影響が卓越することを示唆する。50 年確率波高は狭義の東京湾の外側に位置するアシカ島で 7.1m、浜金谷で 7.2m であり、両地点で資料期間が重複しないにもかかわらず、浦賀水道を挟んで神奈川県側と千葉県側で同程度の値を与える。また、平塚でも 6.9m と同程度の値をとる。これら 3 地点は外洋波浪の伝播を受けるけれども、周辺地形の影響によって波高が減少するため、50 年確率波高は 7m 前後を示す。ただし、アシカ島や浜金谷では第 1 位波高あるいは第 2 位波高までが突出した値となっているので、50 年確率波高の標準偏差は 0.9m と 1.3m、変動係数は 13% と 18% を与え、それぞれ 0.4m と 6% である平塚の結果に比べて 50 年確率波高推定値の信頼区間がかなり広く、信頼度が相対的に低い。

伊勢湾のうち中央部北側のシーバースや湾奥の四日市と城南で 50 年確率波高は 3.2~3.4m であるのに対

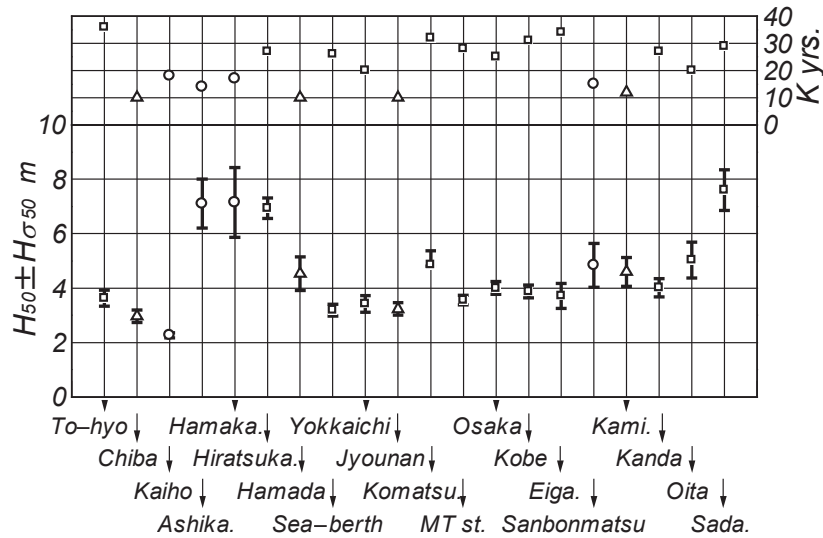


Fig. 7 50-year return wave height and its standard deviation estimated at each measurement station.

して、湾入口に近い浜田では4.5mと大きい。大阪湾内にあるMT局、神戸、大阪では50年確率波高はそれぞれ3.6m、3.9m、4.0mであるから、湾奥で大きい。神戸は友ヶ島水道を通じて伝播する外洋波浪を直接受ける海域より少し東側に位置するため、その影響が小さく、結果的に湾奥の大阪より若干小さい値をとっている。播磨灘では、50年確率波高は兵庫県側の江井ヶ島で3.7m、香川県側の三本松で4.8mと南側の地点で1.1m大きい。ただし上述したように、三本松における波高極値資料の品質は低い。その結果として、50年確率波高の標準偏差と変動係数は0.8mおよび17%をとり、確率波高推定値の信頼区間も大きく、推定値の信頼度が劣る。

瀬戸内海西部海域にある上関、荻田、大分では、50年確率波高は順に4.6m、4m、5mをとる。これらの地点は来襲波浪の特性に関してそれぞれの地理的状況が全く異なる場所に位置する。すなわち、周防灘湾奥の荻田ではE方向の内海発生波浪、別府湾に位置する大分ではNNE～NE方向の内海発生波浪が卓越するのに対して、周防灘と伊予灘の境に位置する上関では豊予海峡から伝播する外洋波浪の影響を少なからず受ける。上関よりさらに西側に位置する海域では、豊予海峡から伝播する外洋波浪の規模が増大する。

5. 結 語

本研究では、東京湾湾奥部から瀬戸内海西部海域の周防灘奥部や別府湾に至る内湾・内海にある複数の観測地点で取得された長期の海上風・波浪観測資料を用いて極値統計解析を行うことにより、そこでの確率風速と確率波高を推定した。検討の結果はつぎのように要約される。

1) 50年確率風速(10m高度換算値)は多くの観測地点で30m/s前後をとる。このうち東京灯標では30m/sを越えるが、相模湾、伊勢湾、大阪湾、播磨灘の観測地点では30m/sより小さい。また瀬戸内海西部海域では、台風などに係わる地理的状況を反映して33～35m/sと他の海域より大きいし、地形による風の収束効果が卓越する佐田岬灯台では40m/sを越える。

2) 50年確率波高は東京湾湾奥の東京灯標で3.6m、東京湾口外から相模湾湾奥の地点で7m、伊勢湾内地点で3.2～4.5m、大阪湾内地点で3.6～4m、播磨灘内地点で3.7～4.8m、瀬戸内海西部海域内地点で4～5mをとる。しかし、大阪湾内で友ヶ島水道に直接面した神戸より西側の海域や瀬戸内海西部海域内で豊予海峡に対面する上関より西側の海域では、それぞれ外洋波浪の伝播を直接受けるので、50年確率波高は大きくなる可能性が高い。

なお、伊勢湾では伊勢湾台風時や台風 7220 号時、大阪湾では室戸台風時、第 2 室戸台風時、台風 6420 号時、台風 6523 号時、台風 6524 号時というように、それぞれの地点における観測資料期間の以前に巨大台風に伴う異常風速・異常波高が生起していることから、風速や波高の再現確率値をより適切な推定値とするためには、これらの異常気象擾乱時の資料を解析に考慮していく必要がある。

最後に、多量の風・波浪観測資料を提供戴いた関係各機関に深く感謝の意を表すとともに、解析には NOWPHAS による波浪観測資料も使用したことを付記する。

参 考 文 献

- [1] 日本気象協会：気象海象要覧－東京湾－，港湾気象海象シリーズ⑬，419p.，1994.
- [2] 日本気象協会：気象海象要覧－大阪湾－，港湾気象海象シリーズ⑭，533p.，1995.
- [3] 日本気象協会：気象海象要覧－伊勢湾・三河湾－，港湾気象海象シリーズ⑮，396p.，1996.
- [4] 日本気象協会：気象海象要覧－瀬戸内海－，港湾気象海象シリーズ⑯，542p.，1998.
- [5] 山口正隆・大福 学・日野幹雄・畑田佳男・森 正憲・野中浩一：内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築－伊勢湾の場合－，海岸工学論文集，第 53 卷，pp.116-120，2006.
- [6] 山口正隆・日野幹雄・大福 学・畑田佳男・野中浩一：内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築－瀬戸内海の場合－，海岸工学論文集，第 54 卷，pp.106-110，2007.
- [7] 日野幹雄・山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一：東京湾における長期の波浪特性の推定，水工学論文集，第 52 卷，pp.1351-1356，2008.
- [8] 鈴木栄一：気象統計学(第 5 版)，地人書館，314 p.，1975.
- [9] 合田良實：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－，鹿島出版会，333p.，1990.
- [10] 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.