

内湾・内海における観測資料を用いた 風速・波高・高潮偏差の再現確率値の推定

Estimating Return Values of Wind Speed, Wave Height and Storm Surge Height Using Measurement Data in the Inner Bay Areas and Seto Inland Sea of Japan

山口正隆¹・大福 学²・野中浩一³・畑田佳男⁴

Masataka YAMAGUCHI, Manabu OHFUKU, Hirokazu NONAKA and Yoshio HATADA

Trend analysis and least-squares-based extreme value analyses are made for the data sets of annual maximum (AM) values and peaks-over-threshold (POT) values which are constructed from the long-year measurement data of sea wind speed, wave height and storm surge height acquired in inner sea areas from Tokyo Bay to the western Seto Inland Sea. The analysis detects hardly any substantial trend with statistical significance in any of the AM data sets. The POT data analyses indicate the following findings: 50-year return wind speed is around 30 m/s, depending on the sea area. 50-year return wave height ranges from 3.2 to 5 m in the inner sea areas and from 5 to 7 m in the areas partly exposed to open sea. 200-year return storm surge height is widely distributed from 76 to 372 cm in the inner sea areas.

1. 緒言

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、波浪、潮位の観測資料が長年にわたり集積されていることから、資料解析に基づいて、風速、波高、高潮偏差（3要素と言う）の再現確率値を評価することが可能になろう。しかし、これに係わる従来の系統的な研究の事例はほぼ見当たらず、3要素の異常値の観測記録が気象海象要覧（日本気象協会，1994；日本気象協会，1995）に記載されているにすぎない。

そこで本研究では、著者らが多方面の機関の協力を得て収集してきたこれらの観測資料を整理・解析することによって、内湾・内海の観測地点における3要素の再現確率値と信頼区間（標準偏差）を推定し、その特性を明らかにする。再現期間は生起頻度を考慮して風速、波高の場合で50年、高潮偏差の場合で200年とする。

2. 極値資料と解析方法

(1) 極値資料の作成

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、10分間平均風速および有義波高の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。高

潮偏差資料は潮汐累年原簿や潮汐観測、気象要覧ほか多くの出版物に掲載された値から採録する。高潮偏差についてはAM資料と台風時極大値資料（T-POT）資料を用いる。

(2) 解析方法

AM資料における傾向変動の有無を有意水準5%の片側検定で、勾配値 $a=0$ の仮説に対する t -検定（有意な増加傾向： $L=+1$ ，減少傾向： $L=-1$ ，傾向変動なし： $L=0$ ）と鈴木（1975）のトレンド示数 I_t （ $|I_t| \geq 1.65$ ：傾向変動あり， $|I_t| < 1.65$ ：傾向変動なし）により調べる。

極値統計解析には、候補分布をGumbel分布、Weibull分布（27種類の形状母数）、FT-II型分布（20種類の形状母数）とし、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法に基づくモデル（Yamaguchi・Hatada, 1997）を用いる。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 $N_T=N$ （T-POT資料で $N_T=2K$ ）とする。解析においては、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、 $N < K$ であり、極値統計解析では、AM資料の最小値を下限 censoring 値とする censoring 問題を仮定することになる。

3. 観測地点および観測資料

(1) 3要素の観測地点

図-1は検討対象とした海上風観測地点（○印）と波浪観測地点（●印）および海上風・波浪の同時観測地点（◎）の位置を東京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海域で示す。江井ヶ島、

1 正会員 工博 愛媛大学名誉教授
2 愛媛大学技術専門職員工学部
3 正会員 工(博) 愛媛大学契約職員工学部
4 正会員 工(博) 愛媛大学講師大学院理工学研究科

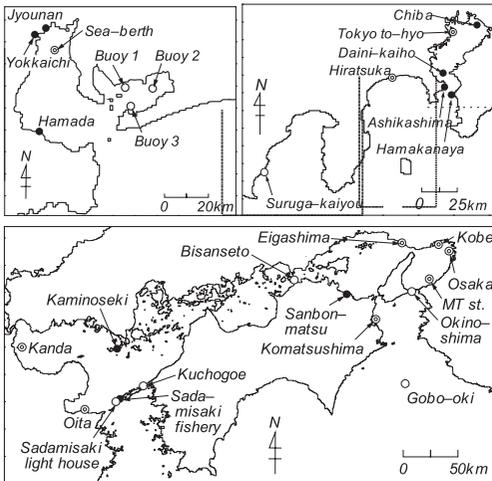


図-1 風, 波浪観測地点の位置

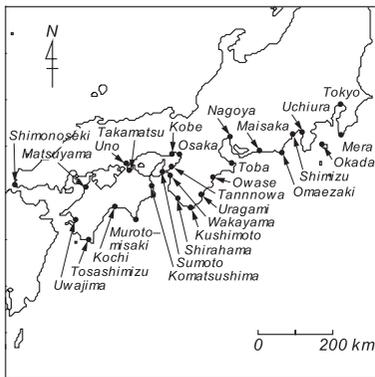


図-2 潮位観測地点の位置

九町越, 佐田岬の准海上風観測地点を含めて海上風観測地点の数は19, 資料年数は10~35年, 波浪観測地点の数は20, 資料年数は10~36年である. 同様に, 図-2は潮位観測地点の位置を示す. 観測地点の数は27, 資料年数は27~105年である. ここでは資料年数が長く, しかも内海・内湾に位置する各12地点についての結果を述べる.

(2) 風観測資料

解析に使用した19地点のうち, 資料年数が20年以上でほぼ欠測を伴わない連続した資料が得られる11地点と資料年数が15年の伊勢湾ブイ1の結果を述べる. 大阪湾の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. これは波高についても同様である. また江井ヶ島では, 定時観測資料の年数は1983~2005年の23年であり, 1972~1982年の11年間については年最大風速資料のみを抽出する. このほか, 小松島で1984~1986年の3年間, 神戸で1991~1992年の2年間, 菟田で1996年の1年間, それぞれ資料を欠く.

(3) 波浪観測資料

解析に使用した20地点のうち資料年数が20年以上の10地点と資料年数18年の第2海堡および14年のアシカ島の結果を検討する. この場合, 観測資料の期間をできるだけ長くとるために, つぎの処理をした.

- 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 (日本気象協会, 1994) 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.
- 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 (日本気象協会, 1995) 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. 年最大波高資料は1994~1996年の3年相当分を欠く.
- ③神戸においては1992年と2001年の2年相当分を, 菟田においては1996年の1年相当分を欠く.
- ④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する. 年最大波高資料は1976~1977年と1981年の3年相当分を欠く.

(4) 潮位観測資料

解析を行った27地点のうち, 12地点を対象とする. 欠落年の資料はつぎのように補充した.

- ①東京においては1911~1948年の間で4年4ケース (最小103cm) のみが知られており, 1949~2006年では1964~1967年の4年分を欠く. 1964年では布良との相関関係 (相関係数 $\rho=0.74$) から51cm (台風6420号), 残り3年では芝浦との相関関係 ($\rho=0.98$) から1965年101cm (台風6524号), 1966年77cm (台風6626号), 1967年59cm (台風6734号) とする. なお, 大阪においては1902~2006年の105年間にわたる最小値25cm以上の資料である.
- ②神戸の欠測年資料は大阪との相関関係 ($\rho=0.95$) を用いて1944年で86cm (台風4416号), 1946年35cm (台風4609号) とする. 同様に, 宇野の欠測年資料は高松との相関関係 ($\rho=0.96$) を用いて1952年65cm (低気圧), 小松島の欠測年資料は洲本との相関関係 ($\rho=0.92$) を用いて1952年35cm (低気圧) とする.

4. 傾向変動および再現確率値の特性

(1) 3要素の傾向変動の解析結果

図-3は1/7乗則によって10m高度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地点で示す. 年最大風速はいずれの地点でも年とともに漸増する傾向にあるようにみえる. 表-1は6地点における年最大風速資料

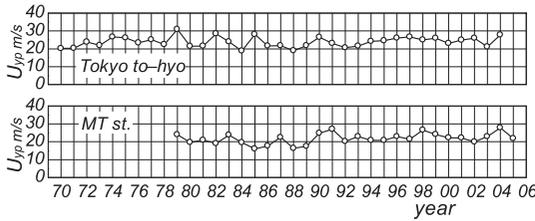


図-3 年最大風速の年変動

表-1 傾向変動解析の結果 (風速)

location	K	a_U	Δa_U	L	I_t
Tokyo to-hyo	35	4.6	8.1	0	1.24
Hiratsuka	26	2.4	10.7	0	0.20
Sea-berth	28	6.8	11.1	0	1.58
MT st.	27	14.5	12.1	1	1.77
Eigashima	34	14.5	10.6	1	2.24
Kuchogoe	31	15.7	15.7	0	1.41

K : yrs., a_U : cm/s/year, Δa_U : cm/s/year

に対する傾向変動解析の結果の一覧を示す。表中の a_U は年最大値資料の勾配値、 Δa_U は有意水準5%でのt検定における勾配値の変動範囲を表す。勾配値 a_U はいずれの地点でも正の値をとるが、統計的に有意な傾向変動がみられるのはMT局と江井ヶ島のみで、しかもその傾向は弱い。同様に、波高に対する解析結果では、江井ヶ島と荏田で弱い増加傾向がみられる。一方、高潮偏差資料には、むしろ負の傾向変動が検出される。これは、AM資料の前半で巨大イベントに伴う突出した値(たとえば、名古屋では1959年伊勢湾台風時の345cm)が生じているためである。

以上のように、風速、波高、高潮偏差の年最大値資料には有意な傾向変動が見出される地点も存在するけれども、その傾向は全般的に弱いことから、本研究ではこの影響を補正せずに、極値解析を進める。

(2) 確率風速の特性

図-4は年最大(AM)風速資料および極大(POT)風速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

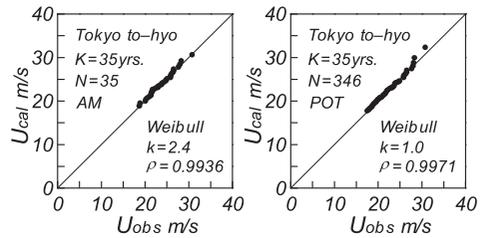


図-4 最適分布のQ-Qプロット (東京灯標)

関係数が示すように、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は45°直線上にほぼ分布する。

表-2はAM資料およびPOT資料に対する極値統計解析の結果を東京灯標、伊勢湾のシーバース、大阪湾のMT局について示す。各地点の結果の第1行目、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(1900年の19を省略)と終わりの年YE(2000年の20または1900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、後出の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。

東京灯標においては、資料年数35年のAM資料について最適分布は形状母数2.4のWeibull分布で相関係数は0.9936と、その適合度はかなり高い。50年確率風速とその標準偏差は 30.3 ± 1.0 m/s、変動係数は3.3%であるから、信頼区間の幅は狭い。POT資料について年平均発生数 λ ($=N/K$)は約10、資料採択率 ν ($=N/N_T$)は1としている。最適分布は形状母数1.0のWeibull分布、相関係数は0.9971であり、その適合度は非常に高い。50年確率風速とその標準偏差は 31.6 ± 0.8 m/s、変動係数は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。

シーバースやMT局においても、POT資料に基づく結果がAM資料に基づく結果と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、最適分布もより高い適合度を与える。また、AM資料よりPOT資料に基づ

表-2 風速資料の極値統計解析の結果

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
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	0.9896	28.0	1.7	6.1
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

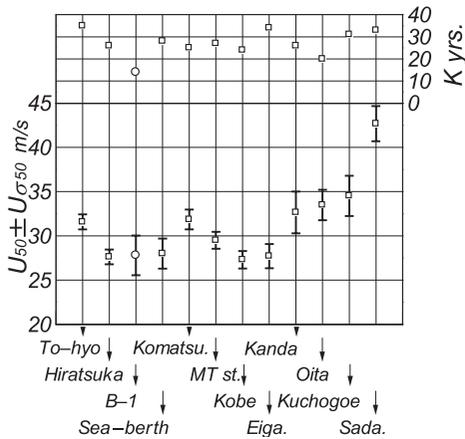


図-5 50年確率風速と標準偏差

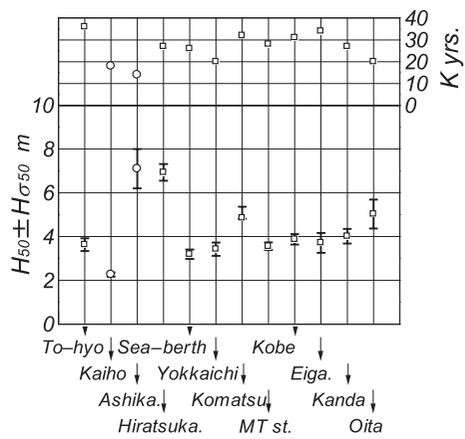


図-6 50年確率波高と標準偏差

く確率風速は若干大きく、標準偏差は少し小さい。これらの特徴は各観測地点でほぼ共通してみられる。POT資料に基づく極値統計解析は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。

図-5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12地点について示す。資料年数が20年以上の地点を□印、14~19年の地点を○印で記す。また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。さて、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。それ以外の地点では、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。確率風速は菊田、大分、九町越、佐田岬灯台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况によるものである。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、紀伊水道北部では30m/sを越えて、内湾部よりやや大きい。

(3) 確率波高と標準偏差

表-3はAM資料およびPOT資料に対する極値統計解析の結果を東京灯標、シーバース、MT局について示す。表示方法は表-2と同じである。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はPOT資料の場合より1に近い値をとり、最適分布の適合度が高い。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をとる一方、その標準偏差と変動係数はAM資料の場合に小さい。また、シーバースやMT局においては、相関係数を除き、上述した風速資料の場合と同様の特徴が確認される。

図-6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12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。50年確率波高を海域別にみると、東京湾口にあたる第2海堡で2.3mと小さく、湾奥の東京灯標で3.6m、湾外のアシカ島で7.1mと大きい。平塚の6.9mはアシカ島と同程度の値を与える。伊勢湾のシーバースと四日市では50年確率波高は3.2、3.4mである。大阪湾内のMT局、神戸ではそれぞれ3.6m、3.9mを示すから、湾奥で大きい。播磨灘の江井ヶ島で

表-3 波高資料の極値統計解析の結果

station	YS	YE	K yrs.	N	N_r	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
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
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

表-4 高潮偏差資料の極値統計解析の結果

station	YS	YE	K yrs.	N	N _T	η_{max} cm	$\eta_{(2)}$ cm	k	ρ	η_{200} cm	$\eta_{\sigma 200}$ cm	CV %
Tokyo	11	06	96	62	96	220	190	W0.9	0.9933	222	32	14.4
	11	06	96	82	192	220	190	W0.9	0.9917	224	33	14.7
Nagoya	50	06	57	57	57	345	197	F3.33	0.9952	381	91	23.9
	50	06	57	100	114	345	197	F4.0	0.9960	372	74	19.9
Osaka	1902	06	105	84	105	292	245	W0.9	0.9934	305	35	11.5
	1902	06	105	144	210	292	245	F7.0	0.9934	303	33	10.9

3.7mであるが、標準偏差と変動係数は0.5mおよび12%をとり、確率波高推定値の信頼度がやや低い。瀬戸内海西部海域にある荊田と大分では、4.0m, 5.0mをとる。周防灘湾奥の荊田では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し、いずれの地点でも豊後水道から伝播する外洋波浪の影響は有意でない。

(4) 確率高潮偏差と標準偏差

表-4は年最大 (AM) 高潮偏差資料と台風時極大 (T-POT) 高潮偏差資料に対する極値統計解析の結果を東京, 名古屋, 大阪について表す。東京については、基準値 η_c を50cmとした解析結果を掲載する。 $\eta_c=40\sim 100$ cmまで10cmごとに変えた解析でも200年確率高潮偏差 η_{200} はほとんど変わらないが、 η_c が小さいほど資料数が多くなって標準偏差 $\eta_{\sigma 200}$ が小さくなる。東京および大阪においては、下限 censoring を受けたAM資料とT-POT資料による200年確率高潮偏差と標準偏差、したがって変動係数はほとんど変わらず、東京では最適分布も同じである。完全資料が得られる名古屋においては、200年確率高潮偏差に関してAM資料とT-POT資料に基づく結果の差は有意でないが、標準偏差や変動係数に関しては、T-POT資料に基づく値がより小さい。

図-7はT-POT資料に基づく200年確率高潮偏差 η_{200} とその標準偏差 $\eta_{\sigma 200}$ および資料年数Kを12地点で与える。資料年数は東京の96年、大阪の104年、清水の49年のほか、57年あるいは58年である。200年確率高潮偏差は76～370cmと広い範囲に分布し、地点への依存性が非常に強いし、巨大高潮の生起は希現象であるので、確率高潮偏差の大きい地点ではその変動係数も大きい。因みに、200年確率高潮偏差とその変動係数は名古屋で372cm, 19.9%, 大阪で303cm, 10.9%, 東京で224cm, 14.7%, 清水で76cm, 5.3%である。これらの値は伊勢湾台風時に突出した高潮偏差を生じた名古屋で大きい一方、水深1000m以上の駿河湾に面する清水では小さい。

5. 結語

以上の検討結果はつぎのように要約される。

- ①内湾・内海で今回収集・整理した風速, 波高, 高潮偏

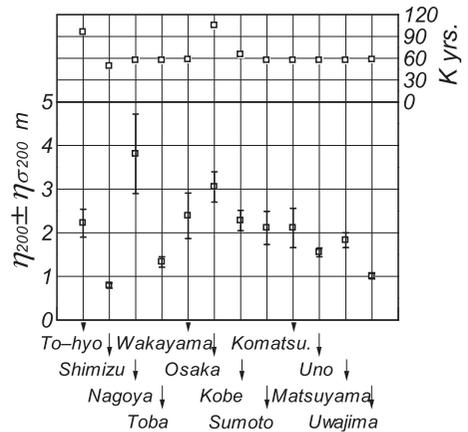


図-7 200年確率高潮偏差と標準偏差

差の極値資料を用いる極値統計解析においては、傾向変動に対する補正をほとんど必要としない。

- ②50年確率風速は30m/s前後の値をとり、相模湾, 伊勢湾, 大阪湾, 播磨灘では30m/sより小さく、東京湾, 紀伊水道, 瀬戸内海西部海域では30m/sより大きい。
- ③50年確率波高は内湾・内海発生波浪が卓越する地点で3.2～5m, 外洋から入射する波浪の影響を受ける地点では5～7mを与える。
- ④200年確率高潮偏差は、各地点の地形特性などに応じて75～372cmと広い範囲に分布し、とくに名古屋では372cm (変動係数20%) と評価される。
- ⑤再現確率統計量の変動係数は極値資料に突出した値を含むか否かによって大きく変化し、とくに希現象である高潮偏差の場合には、その影響が強く現われる。

参考文献

鈴木栄一 (1975) : 気象統計学 (第5版), 地人書館, 314 p.
 日本気象協会 (1994) : 気象海象要覧-東京湾-, 港湾気象海象シリーズ⑬, 419p.
 日本気象協会 (1995) : 気象海象要覧-大阪湾-, 港湾気象海象シリーズ⑭, 533p.
 Yamaguchi, M. and Y. Hatada (1997) : 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.