

2種類の海上風分布資料を用いた東京湾および伊勢湾における 波浪推算の精度比較

Intercomparison of Wave Hindcasts Using Two Kinds of Sea Wind Distribution Data in Tokyo Bay and Ise Bay

山口正隆*・大福 学**・畑田佳男***・野中浩一**

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

Shallow water wave hindcasting in Tokyo Bay and Ise Bay was independently conducted using two kinds of wind distribution data for each of many storms in recent years. One hindcasting is estimated using the measurement data of sea and coastal winds and the other using the measurement data of on-land SDP winds. Accuracy of the hindcast wave heights is evaluated with the 4 error indices obtained from the comparison between hindcasts and measurements at several stations in each bay. Various statistics of the error indices give the following indications; 1) Measurement winds-based hindcasts show a 8-(Tokyo Bay) or 5-(Ise Bay) overestimation for wave height at individual times and good agreement on average with the measurement for the maximum wave height during a storm. 2) SDP winds-based hindcasts yield on average a 14% overestimation for wave height at individual times and a 3-(Tokyo Bay) or 8-(Ise Bay) overestimation for the maximum wave height during a storm. 3) Accuracy of the measurement winds-based hindcasts is higher than that of the SDP winds-based hindcasts in Ise Bay but the contrary may hold true in Tokyo Bay. 4) Each of the hindcasts may be said to give reasonable evaluation for the maximum wave height during a storm in spite of a somewhat high overestimation for wave height at individual times.

Key Words ; wave hindcasting, two kinds of wind distribution data, Tokyo Bay, Ise Bay, wave height error statistics

1. 緒 言

内海・内湾において周辺地形の影響を受けた海上風分布の推定法の中に、①対象海域にある海上・

*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

** (前) 愛媛大学工学部環境建設工学科

(former) Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

***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

原稿受理 平成24年10月5日

沿岸観測地点で得られた観測風を空間補間する方法^[1]、②対象海域を囲む陸上域にある気象官署で取得された観測風（SDP 風）を利用する方法^[2]、がある。これらの方法は瀬戸内海、伊勢湾、東京湾を含む関東沿岸海域における長期の海上風分布資料の作成^{[2], [3]}に適用されており、得られた海上風分布を入力条件とする長期の波浪推算^{[4], [5], [6]}や多くのストーム時の波浪推算^{[7], [8]}が各海域で行われている。そして、山口ら^{[9], [10]}は海上地点や沿岸地点の風および波浪観測地点の波高に対する推算精度を観測資料との広範な比較に基づいて確認している。また、山口ら^{[11], [12]}は瀬戸内海を対象としてメソ気象モデル MM5 の適用^[13]および SDP 風資料より推定された 15 ケースの台風時の海上風分布から得た複数海上地点の推算風と観測風の比較^[11]、さらに観測風や SDP 風および MM5 の適用に基づく海上風分布を入力条件とする波浪推算から得た複数地点の推算波高と観測波高の比較^[12]に基づいて、それぞれの風・波高資料の精度を明らかにしている。

本研究では、東京湾と伊勢湾を対象として観測風および SDP 風に基づく海上風分布を入力条件とする波浪推算の精度を、多数のストーム時の多くの波浪観測地点における推算波高と観測波高の時別値のみならず最大値に対する比較から包括的に検討する。比較にあたり、波高に関する 4 種類の誤差指標の統計量を用いる。

2. 波浪推算の概要

2.1 海上風分布資料

(1) 観測風資料

山口ら^[3]は Fig. 1 に示すように、東京湾を含む関東沿岸海域や伊勢湾の海上部（●印）と沿岸部（○印）の観測風資料および外洋に接続する境界上の複数地点（□印）において台風モデル風を組み込んだ表面風再解析資料（NCEP 風）を空間補間することによって、各海域における格子間隔 2 km の海上風分布のデータセット（obsW）を 1 時間ごとに作成した。期間は関東沿岸海域で 1979～2004 年の 26 年、伊勢湾で 1995～2003 年の 9 年であり、これらから各海域に高波をもたらしたと考えられる 2～3 日間のストームを抽出した。

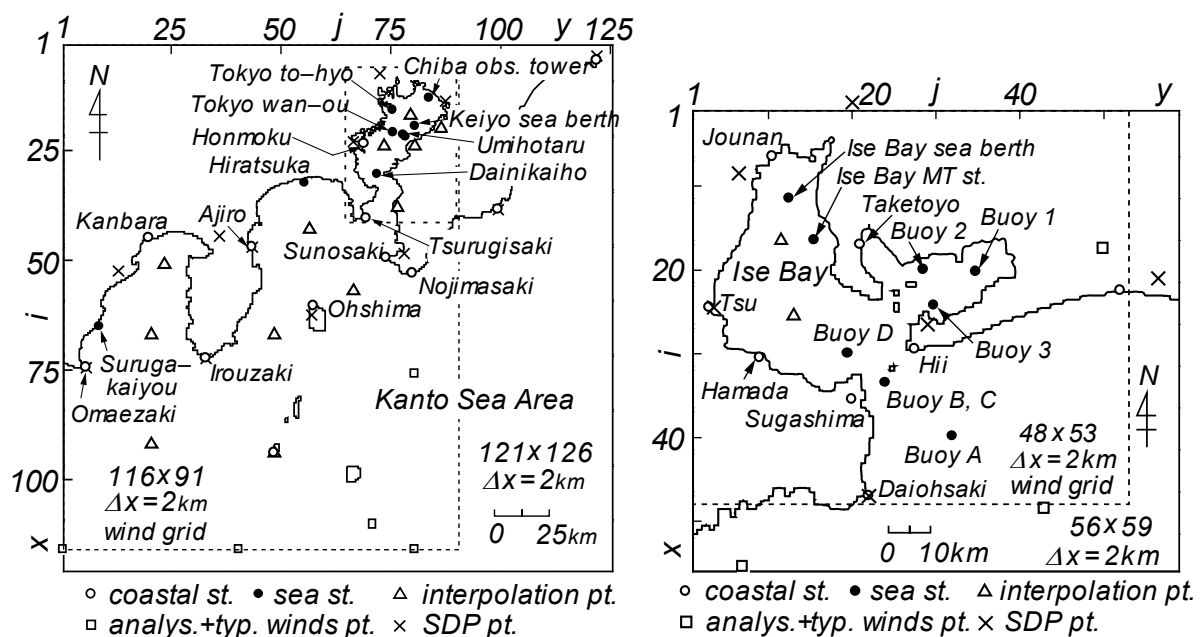


Fig. 1 Domains for wind estimation in Kanto sea area including Tokyo Bay and Ise Bay.

(2) SDP 風資料

山口ら^[2]は関東沿岸海域、伊勢湾の周辺陸上部に位置する気象官署 (Fig. 1 の×印) で取得された SDP 観測風資料と各領域の外洋境界上の代表点 (□印) で求めた、台風モデル風の埋込みを伴う表面風再解析 (NCEP 風) 資料を用いて各海域の海上部 (●印) と沿岸部 (○印) における風を補間し、ついで回帰式の適用により観測相当風へ変換したのち、これらの資料と NCEP 風資料に対する空間補間によって格子間隔 2 km の海上風分布 (SDP) のデータセットを作成した。期間は 1961~2005 年の 45 年、時間間隔は 1 時間である。波浪推算の対象とするストームは期間を 2~3 日として観測風資料の場合と同じケースをデータセットから抽出した。対象期間は観測風資料の期間に合わせた 1979~2004 年の 26 年 (東京湾) あるいは 1995~2003 年の 9 年 (伊勢湾) である。

2.2 波浪推算の方法

Fig. 2 は波浪推算に用いる格子間隔 1 km の格子網を東京湾と伊勢湾について示す。波浪推算^[8]では各海域の南側境界 (伊勢湾では南側に加えて東側境界) 上の代表地点 (図中の*印) で 1 点浅海モデルにより計算した方向スペクトルを流入条件とするとともに、上記の観測風資料あるいは SDP 風資料に基づく各ストーム時の海上風分布を入力条件として碎波に伴うエネルギー減衰を段波モデルで評価する格子点浅海モデルにより 1 分間隔で行う。用いる周波数の個数は 0.047~1 Hz 間を不等分割した 20 個、方向データの個数は 0~360° を 20° で分割した 19 個である。

1 点浅海モデルによる波浪推算は格子間隔 5 km の北西太平洋大領域と、それぞれ格子間隔 1 km および 0.1 km の対象海域からなる 3 段階格子網 (東京湾) あるいは格子間隔 0.1 km (伊勢湾) からなる 2 段階格子網において、格子間隔 80 km の北西太平洋領域で台風モデル風を埋込んだ表面風再解析資料の 1 時間値、対象海域では観測風資料あるいは SDP 風資料に基づく格子間隔 2 km の海上風分布の 1 時間値を入力条件として、時間間隔 1 時間で実施する。周波数・方向条件は上記の条件と同じである。境界地点別に得た方向スペクトルは時間に関して 1 分、空間に関して 1 km ごとに線形補間する。

2.3 波浪観測資料

波浪推算資料と波浪観測資料との比較を行う地点は東京湾で東京灯標、千葉 (港) 観測塔、東京湾中央地点、第 2 海堡 (以上は湾内地点)、アシカ島 (湾外地点) の 5 地点、伊勢湾で城南、四日市、伊勢湾シーバース、伊勢湾地点、浜田、ブイ D (以上は湾内地点)、ブイ C、ブイ B、ブイ A (以上は湾外地点) の 9 地点である。このうちの 20 年間以上の観測資料が得られている地点は東京灯標、伊勢湾シ

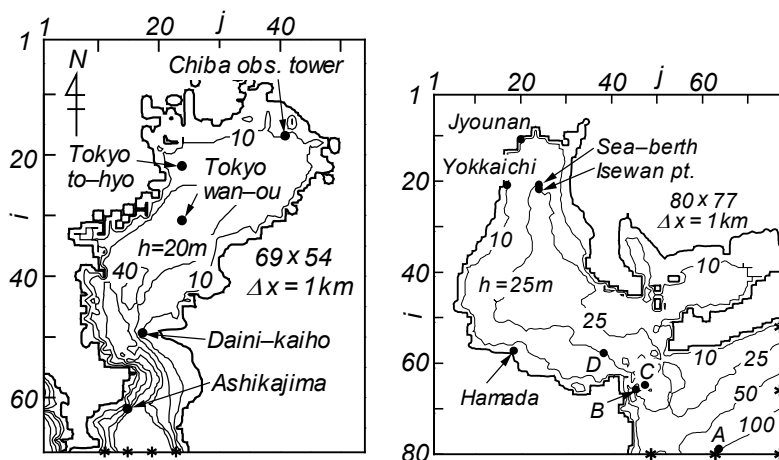


Fig. 2 Domains for wave hindcasting in Tokyo Bay and Ise Bay.

ーバース（波高は 10 cm 単位）である。これら以外の地点では 1991 年以降（第 2 海堡，アシカ島）あるいは 1995 年以降（城南，浜田）の資料が得られている地点が多いし，ごく短い期間の観測地点（伊勢湾地点）や波浪観測が終了した地点（四日市，ブイ D，ブイ C，ブイ B）も少なくない。また，観測期間中であっても観測資料が欠測や波高計の不具合により得られないストームもかなりある。さらに，内湾・内海における周期観測資料はその時系列特性からみて適正な挙動を示さないことが多いので，比較対象とすることはあまり推奨されない。ここでは，できるだけ多くのストームに対して，できるだけ多くの地点で推算時系列と観測時系列の比較を進めることを目指すけれども，比較対象は（有義）波高に限定する。

2.4 波高誤差指標の導入

Fig. 3 は 2002 年 10 月の台風 (T) 0221 時に 2 種類の海上風分布資料 (obsW と SDP と略記) を利用して得た推算波高 (H_{sobsW} , H_{sSDP}) と観測波高 (H_{sobs}) の時系列の 1 例を東京灯標について示し，いずれの推算波高も観測波高の変化によく追従する。Fig. 4 は Fig. 3 に与えた各推算波高時別値 H_{scal} と観測波高時別値 H_{sobs} の散布図を表す。図中には，相関係数 ρ_H ，原点を通る相関直線の勾配値 a_{0H} ，2 乗平均平方根波高誤差 σ_H の無次元値 $\tilde{\sigma}_H$ を記す。検討対象とするストームは内湾・内海発生波浪が卓越する地点と外洋から伝播する波浪の影響を受ける地点（括弧内）で観測波高 H_{sobs} が 0.3 m (0.5 m) 以上の期間の平均（有義）波高 \bar{H}_{obs} が 0.6 m (1.0 m) 以上で観測最大（有義）波高 H_{maxobs} が 0.9 m (1.5 m) を上まわるケースとする。ここでは，各ストーム時の各観測地点において推算波高に関する 4 種類の誤差指標

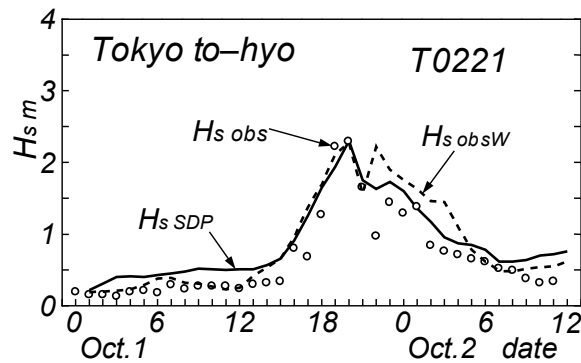


Fig. 3 Time variation of wave heights during the typhoon T0221 based on measurements and two kinds of hindcasts at Tokyo to-hyo.

相関係数 ρ_H ，原点を通る相関直線の勾配値 a_{0H} ，2 乗平均平方根波高誤差 σ_H の無次元値 $\tilde{\sigma}_H$ を記す。検討対象とするストームは内湾・内海発生波浪が卓越する地点と外洋から伝播する波浪の影響を受ける地点（括弧内）で観測波高 H_{sobs} が 0.3 m (0.5 m) 以上の期間の平均（有義）波高 \bar{H}_{obs} が 0.6 m (1.0 m) 以上で観測最大（有義）波高 H_{maxobs} が 0.9 m (1.5 m) を上まわるケースとする。ここでは，各ストーム時の各観測地点において推算波高に関する 4 種類の誤差指標

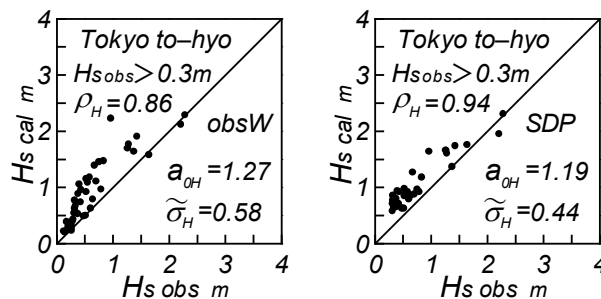


Fig. 4 Scatter diagram between measurements- and hindcasts-based wave heights at Tokyo to-hyo.

ρ_H ， a_{0H} ， $\tilde{\sigma}_H (= \sigma_H / \bar{H}_{obs})$ ， $\tilde{H}_{max} (= H_{maxcal} / H_{maxobs})$ によって推算精度を

代表させる。地点間およびストーム間の比較を可能にするために，期間平均波高 \bar{H}_{obs} により無次元化した 2 乗平均平方根波高誤差 $\tilde{\sigma}_H$ を用いる。同様の目的から，ストーム時の最大観測波高 H_{maxobs} で無次元化した最大波高 \tilde{H}_{max} を用いる。Fig. 3 の事例では， \tilde{H}_{max} は観測風資料を用いた場合と SDP 風資料を用いた場合の両者について，それぞれ $1.00 (= 2.28 \text{ m} / 2.29 \text{ m})$ および $1.00 (= 2.30 \text{ m} / 2.29 \text{ m})$ である。

3. 誤差指標による精度の検討

Fig. 5 は 2 種類の波浪推算資料より得た 4 種類の波高誤差指標の頻度分布を東京湾の場合（ケース数 89）について示す。図には各誤差指標の平均値 m と標準偏差 σ および出現率 γ を与える。出現率 γ はそれぞれ $\rho_H > 0.80$ ， $a_{0H} = 0.8 \sim 1.2$ ， $\tilde{\sigma}_H < 0.40$ ， $\tilde{H}_{max} = 0.8 \sim 1.2$ をとるケース数の，全ケースに対する

割合とする。また、実線は平均値 m 、点線は標準偏差を加減した $m \pm \sigma$ を表す。

観測風資料に基づく海上風分布を入力条件として得た波高資料の場合、 ρ_H は 0.35~1 (0.8 を上まわる出現率 0.60)、 \tilde{a}_{0H} は 0.7~1.5 (0.8~1.2 の出現率 0.63)、 $\tilde{\sigma}_H$ は 0.1~0.7 (0.4 を下まわる出現率 0.46)、 \tilde{H}_{max} は 0.6~1.5 (0.8~1.2 の出現率 0.64) の範囲にあり、平均値と標準偏差は順に ρ_H に対して 0.79 ± 0.16 、 \tilde{a}_{0H} に対して 1.08 ± 0.20 、 $\tilde{\sigma}_H$ に対して 0.42 ± 0.13 、 \tilde{H}_{max} に対して 1.00 ± 0.19 である。推算波高時系列と観測波高時系列はある程度符合するものの、推算波高が観測波高よりやや大きい。また、最大波高に関して両者はほぼ対応する。一方、SDP 風資料に基づく海上風分布を入力条件として得た波高資料の場合、 ρ_H は 0.45~1 (0.8 を上まわる出現率 0.74)、 \tilde{a}_{0H} は 0.7~1.5 (0.8~1.2 の出現率 0.61)、 $\tilde{\sigma}_H$ は 0.1~0.7 (0.4 を下まわる出現率 0.49)、 \tilde{H}_{max} は 0.7~1.5 (0.8~1.2 の出現率 0.81) の範囲をとり、平均値と標準偏差は順に ρ_H に対して 0.84 ± 0.10 、 \tilde{a}_{0H} に対して 1.14 ± 0.15 、 $\tilde{\sigma}_H$ に対して 0.40 ± 0.11 、 \tilde{H}_{max} に対して 1.03 ± 0.14 を与える。これは推算波高と観測波高の対応は時系列や最大波高を含めてかなりよいが、時別値に関して推算値が観測値より平均的に 14% 大きい傾向を示唆する。2 種類の風資料に基づく結果を比べると、観測資料に基づく結果において \tilde{a}_{0H} の平均値 (1.08) が 1 より近く、 \tilde{H}_{max} の平均値も 1 をとるものの、他の統計量 (平均値、標準偏差、 \tilde{a}_{0H} のケースを除く出現率) は SDP 風資料に基づく推算波高の精度が観測風資料に基づく結果より高い傾向にあることを示唆する。

Fig. 6 は 4 種類の波高誤差指標の頻度分布を伊勢湾の場合 (ケース数 45) について示す。東京湾の場合 (観測地点数 5 ヶ所、対象期間 26 年) に比べて観測地点数 (9 ヶ所) が多いにもかかわらず対象期間 (9 年) が短いことから、対象ケース数は東京湾の場合 (89 ケース) のほぼ 1/2 になっている。観測風資料による場合 ρ_H は 0.5~1 (0.8 を上まわる出現率 0.80)、 \tilde{a}_{0H} は 0.8~1.5 (0.8~1.2 の出現率 0.84)、 $\tilde{\sigma}_H$ は 0.1~0.6 (0.4 を下まわる出現率 0.93)、 \tilde{H}_{max} は 0.5~1.4 (0.8~1.2 の出現率 0.67) にあり、平均値と標準偏差は ρ_H に対して 0.86 ± 0.12 、 \tilde{a}_{0H} に対して 1.05 ± 0.15 、 $\tilde{\sigma}_H$ に対して 0.29 ± 0.09 、 \tilde{H}_{max} に対して 1.01 ± 0.18 を与える。波高時系列に関して推算値は観測値にかなりよく追従して変化し、推算値は観測値を平均的に 5% 上まわる程度で比較的良好に対応する。 \tilde{H}_{max} に対しても両者は平均的に符合する。一方、SDP 風資料による場合 ρ_H は 0.45~1 (0.8 を上まわる出現率 0.73)、 \tilde{a}_{0H} は 0.7~1.5 (0.8

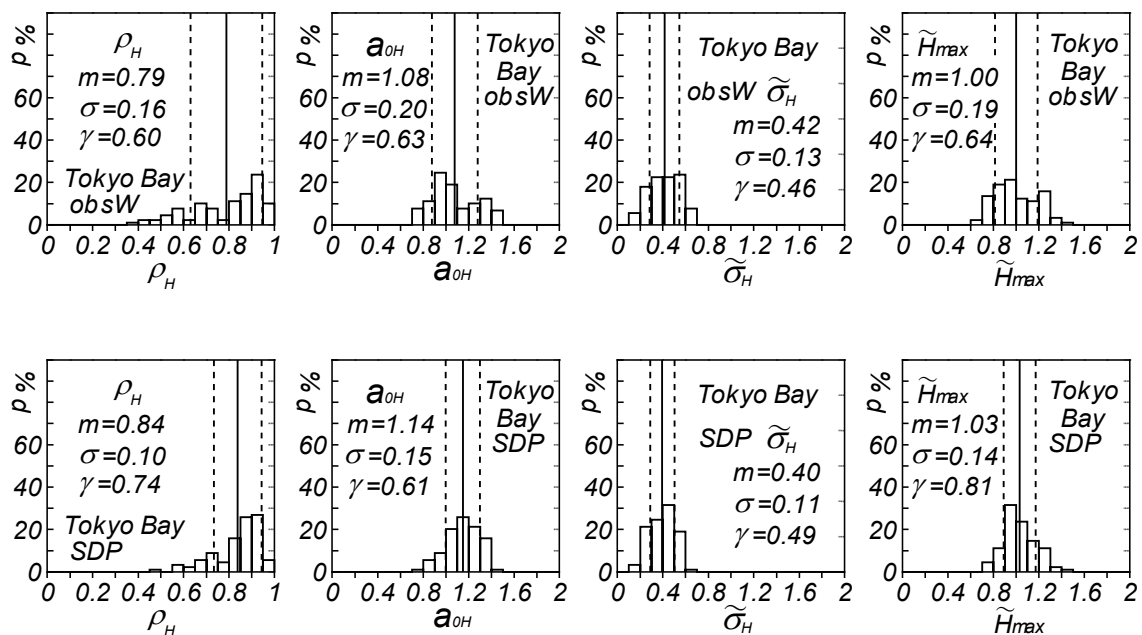


Fig. 5 Histograms of 4 error indices for wave heights at measurement stations in Tokyo Bay.

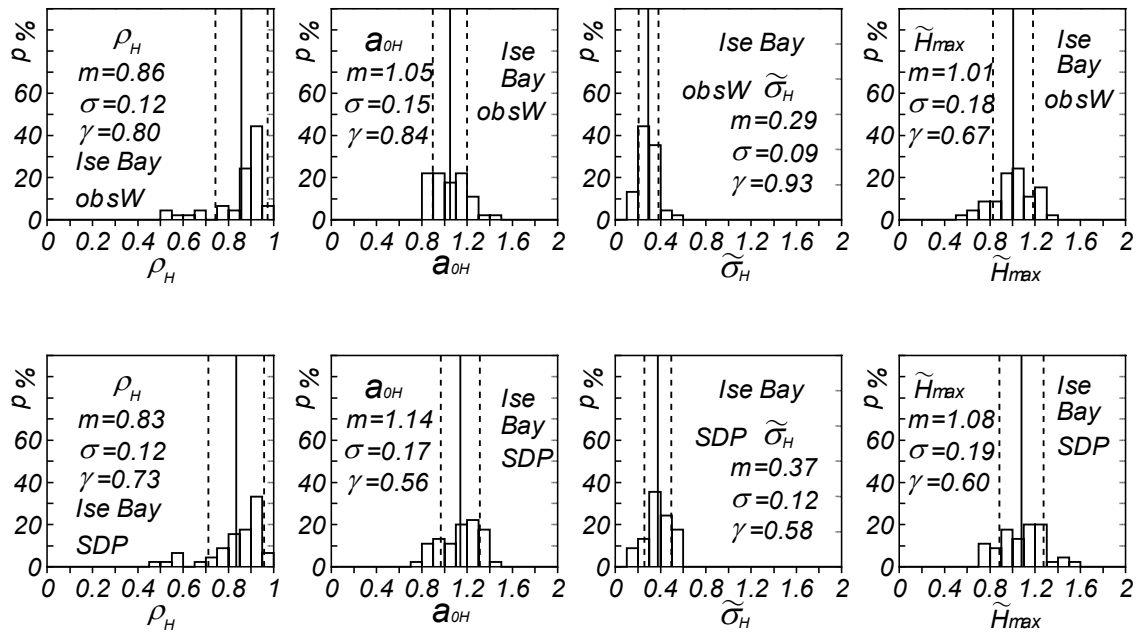


Fig. 6 Histograms of 4 error indices for wave heights at measurement stations in Ise Bay.

～1.2 の出現率 0.56), $\tilde{\sigma}_H$ は 0.1～0.6 (0.4 を下まわる出現率 0.58), \tilde{H}_{max} は 0.7～1.6 (0.8～1.2 の出現率 0.60) にあり, 平均値と標準偏差は順に ρ_H に対して 0.84 ± 0.12 , \tilde{a}_{0H} に対して 1.14 ± 0.17 , $\tilde{\sigma}_H$ に対して 0.37 ± 0.12 , \tilde{H}_{max} に対して 1.08 ± 0.19 をとる。波高時系列の変化に対して推算値は観測値によく追従するが, 平均的に 14% 大きい。また, \tilde{H}_{max} に対して 8% 過大な値を与える。2 種類の風資料による結果を比較すると, 4 つの誤差指標の平均値と標準偏差のすべてについて観測風資料に基づく推算波高が SDP 風資料に基づく推算波高より高い精度を与えることを示唆する。

Table 1 は東京湾 (5 地点) と伊勢湾 (9 地点) における誤差指標の統計値 (m , σ , γ) の一覧を出現率 γ の計算条件およびケース数 N とともに示す。観測風資料を入力条件とする場合には波高の特別値に対してやや大きめの評価を与えるものの, 最大波高に対して平均的に一致する結果を与える。一方, SDP 風資料を入力条件とする場合, 波高の特別値をやや過大評価する傾向にあり, ストーム時最大波高 \tilde{H}_{max} に対してもその傾向をもつ。各種統計値は伊勢湾では観測風資料を入力条件とする場合の推算波高の精度が SDP 風資料を入力条件とする場合より高い特徴を示唆するのに対して, 東京湾では相関係数 ρ_H の平均値と 2 乗平均平方根波高誤差 $\tilde{\sigma}_H$ の平均値や各種誤差指標の標準偏差および出現

Table 1 Mean, standard deviation and range-limited occurrence rate for each of wave heights-related 4 error indices at measurement stations in Tokyo Bay and Ise Bay.

Area	Data	N	$\rho_H \times 10^2$			$a_{0H} \times 10^2$			$\tilde{\sigma}_H \times 10^2$			$\tilde{H}_{max} \times 10^2$		
			m	σ	γ	m	σ	γ	m	σ	γ	m	σ	γ
Tokyo Bay	obs	89	79	16	60	108	20	63	42	13	46	100	19	64
	SDP	89	84	10	74	114	15	61	40	11	49	103	14	81
Ise Bay	obs	45	86	12	80	105	15	84	29	9	93	101	18	67
	SDP	45	84	12	73	114	17	56	37	12	58	108	19	60
condition			$\gamma(> 80)$			$\gamma(80 \sim 120)$			$\gamma(< 40)$			$\gamma(80 \sim 120)$		

率について逆の傾向を示す。

ついで、 $\rho_H > 0.75$, $\tilde{a}_{0H} = 0.7 \sim 1.3$, $\tilde{\sigma}_H < 0.5$, $\tilde{H}_{max} = 0.6 \sim 1.4$ の条件を同時に満たすケース数の%値は、東京湾では観測風資料を入力条件とする場合 38 %, SDP 風資料を入力条件とする場合 61 %, 伊勢湾ではそれぞれ 80 %および 63 %であるから、東京湾では SDP 風資料を入力条件とする場合の推算波高の精度が観測風資料を入力条件とする場合より高く、逆に伊勢湾では観測風資料を入力条件とする場合の推算波高の精度が SDP 風資料を入力条件とする場合よりかなり高い傾向にある。

4. 結 語

- 2 種類の海上風分布資料を入力条件とする推算波高に対する精度検討の結果、つぎのことが言える。
- 1) 観測風資料を入力条件とする場合の推算波高の時別値は観測波高値より平均的に 8 % (東京湾) あるいは 5 % (伊勢湾) 大きい、ストーム時最大波高に関して両湾で推算値と観測値は平均的にほぼ符合する。
 - 2) SDP 風資料を入力条件とする場合、東京湾と伊勢湾における推算波高時別値は観測波高値より平均的に 14 % 大きい値を与えるが、ストーム時最大波高に対しては観測値より平均的に 3 % (東京湾) あるいは 8 % (伊勢湾) 大きめの評価となる程度であり、観測最大波高との対応は悪くない。
 - 3) 東京湾では勾配値 \tilde{a}_{0H} の平均値と出現率および最大波高 \tilde{H}_{max} の平均値を除く各種誤差指標の統計値は SDP 風資料を入力条件とする推算波高の精度が観測風資料を入力条件とする場合より高いことを示唆するが、伊勢湾では各種誤差指標の統計値は逆の傾向 (観測風資料を入力条件とする推算波高の精度が SDP 風資料を入力条件とする場合より高い) を示す。
 - 4) 各誤差指標に対する制限値 $\rho_H > 0.75$, $a_{0H} = 0.7 \sim 1.3$, $\tilde{\sigma}_H < 0.5$, $\tilde{H}_{max} = 0.6 \sim 1.4$ を同時に満たすケース数をみても、東京湾では SDP 風資料を入力条件とする推算波高の精度がより高く、逆に伊勢湾では観測風資料を入力条件とする推算波高の精度がより高いことを示唆する。
 - 5) いずれの風資料を入力条件とする場合にも推算波高の精度は波高時別値に対する若干の過大評価を除いて、とくにストーム時最大波高に対して有意と言える。

最後に、膨大な風・波浪観測資料を提供戴いた多くの関係機関に謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 山口正隆・渡辺 健・畑田佳男：大阪湾における海上風の平面分布特性について，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp.168-172，1981.
- [2] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄：SDP 風資料を用いた内湾・内海における 45 年間の海上風分布データセットの作成，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，pp.186-190，2009.
- [3] 山口正隆・大福 学・日野幹雄・野中浩一・畑田佳男：内海・内湾における風候と確率風速の評価，水工学論文集，第 53 卷，pp.1477-1482，2009.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一・日野幹雄：SDP 風資料を用いた内湾・内海における波浪の長期推算システムの適用性，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.151-155，2010.
- [7] 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・森 正憲：瀬戸内海における確率波高の推定，海岸工

学論文集, 第 55 卷, pp.131-135, 2008.

- [8] 山口正隆・畑田佳男・野中浩一：SDP 風資料を用いた波浪推算モデルの東京湾・伊勢湾における適用性と波高極値の推定, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_941-I_946, 2012.
- [9] 山口正隆・大福 学・野中浩一・日野幹雄・畑田佳男：SDP 風資料に基づく東京湾, 伊勢湾, 瀬戸内海の観測地点における海上風の精度評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.I_1669-I_1674, 2012.
- [10] 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・日野幹雄：SDP 風資料に基づく東京湾, 伊勢湾, 瀬戸内海の沿岸風・海上風・波高資料の精度評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_935-I_940, 2012.
- [11] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄：SDP 観測風資料およびメソ気象モデル MM5 に基づく瀬戸内海の海上風分布資料の精度評価, 水工学論文集, 第 55 卷, pp. S_1621-S1626, 2011.
- [12] 山口正隆・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄：瀬戸内海における 3 種類の海上風分布資料に基づく波浪推算の誤差評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, 2013 (投稿中).
- [13] 李 漢洙・山下隆男・駒口友章・三島豊秋：瀬戸内海の台風気象場, 高潮・波浪の再解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.441-445, 2009.