

瀬戸内海における3種類の海上風分布を用いた波浪推算の相互比較

Intercomparison of Wave Hindcasts Using Three Kinds of Sea Wind Distribution in the Seto Inland Sea

山口正隆*・野中浩一**・畑田佳男***

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

Shallow water wave hindcasting in the Seto Inland Sea was conducted for each of 15 typhoons during the year period of 1980-2005. The hourly wind distribution in the Inland Sea was estimated by use of any of (1) a mesoscale meteorological model MM5, (2)SDP(Surface Data Product) wind data acquired at the on-land meteorological observatories and (3)wind data measured at the sea and coastal stations in the Inland Sea. The degree of agreement between the time series of hindcasted and measured wave height was evaluated by 4 error indices. A statistical analysis of the indices for 97 cases suggests that the measurement winds-based run yields the highest accuracy among the three kinds of hindcasts, and that the SDP winds-based run provides comparable or slightly less accuracy than the measurement winds-based run.

Key Words ; wave hindcasting, three kinds of wind distribution data, the Seto Inland Sea, wave height error statistics

1. 緒 言

瀬戸内海のような内海・内湾における波浪推算の精度を確保するためには、周辺地形の影響を適切に評価した海上風分布資料を用いる必要がある。こうした場合の海上風分布の推定方法として、いくつかの方法(岡田ら^[1], 山口ら^{[2], [3], [4]}, 李ら^[5])が開発され、その適用事例が示されている。この中で李ら^[4]は1971~2006年の20ケースの台風にもツ氣象モデルMM5を適用することによって瀬戸内海における台風時海上風分布を求め、そのデータセットの提供が可能であることを論文の中で述べている。

本研究では、提供を受けた当該20ケースのうち海上風観測資料の入手が可能な1980~2005年の15ケースの台風に対し、①MM5(李ら^[5])により得た海上風分布資料(MM5風海上風分布資料)、②SDP風資料(山口ら^[4])より得た海上風分布資料(SDP風海上風分布資料)、③観測風資料(山口ら^{[2], [3]})

*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University Engineering for Production and Environment,

** (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

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

原稿受理 平成24年10月5日

より得た海上風分布資料（観測風海上風分布資料）を入力条件とした格子点浅海モデルによる波浪推算を行い、（有義）波高 H_s の時系列に関して瀬戸内海にある複数の波浪観測地点における観測結果と推算結果から得た 4 種類の誤差指標を用いてそれぞれの推算精度を評価する。波浪推算では主として瀬戸内海における海上風分布資料のみが異なることから、波浪推算の結果にそれぞれの海上風分布の特性が反映される。

2. 波浪推算と解析方法

2.1 海上風分布資料

(1) MM5 風海上風分布資料

李ら^[5]は MM5 による気象場（海上風分布を含む）を格子間隔 3 km の瀬戸内海領域で 1 時間ごとに得ている。海上風分布資料は加重 1 次補間法を用いて SDP 風資料および観測風資料による海上風分布と同じ格子間隔 2 km の瀬戸内海領域（後出の Fig. 2）に空間補間した。Table 1 は 1980 年（台風（T）8013 号）以降の 15 台風の名前と波浪推算の期間を表す。Fig. 1 は 15 台風の経路を 4 つの図に分割して与える。各台風は経路や進行方向に関して多様な形態をとり、瀬戸内海のいずれかの観測地点で比較的大きい高潮偏差を記録している（李ら^[5]）。

Table 1 Name of typhoon and period of wave hindcasting.

typ.	period (M/D/JST)	typ.	period (M/D/JST)
T8013	9/10/00~9/12/23	T0111	8/20/00~8/22/23
T9014	8/21/00~8/23/23	T0310	8/08/00~8/09/23
T9119	9/27/00~9/28/23	T0410	7/31/00~8/02/23
T9210	8/08/00~8/09/23	T0416	8/29/00~8/31/23
T9313	9/03/00~9/04/23	T0418	9/06/00~9/08/23
T9612	8/12/00~8/15/23	T0421	9/29/00~9/30/23
T9719	9/16/00~9/17/23	T0514	9/05/00~9/07/23
T9918	9/23/00~9/24/23		

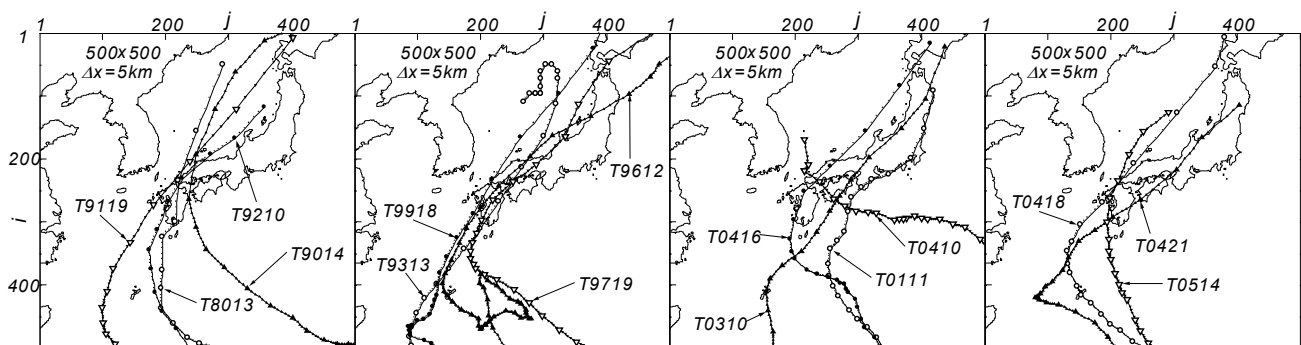


Fig. 1 tracks of 15 investigated typhoons.

(2) SDP 風海上風分布資料

山口ら^[4]は 1961~2005 年の 45 年間について、対象海域周辺の陸上気象官署で取得された SDP 風資料より対象海域の海上風分布を推定する方法を開発し、その精度が有意であることを確認した。

Fig. 2 は格子間隔 2 km の瀬戸内海領域を示す。図には気象官署（×印、佐田岬と土佐沖ノ島の 2 灯

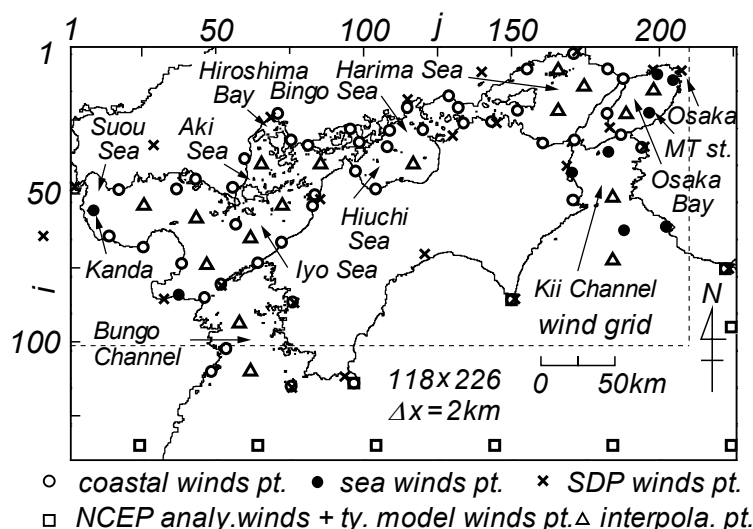


Fig. 2 Domain for estimating sea wind distributions in the Seto Inland Sea.

台を含む), 外洋境界の地点 (□印), 海上観測地点 (●印), 沿岸観測地点 (○印) および海上風分布の適正評価のために設けた中間地点 (△印) を与える。波浪推算に使用する海上風分布は上記のデータセットから Table 1 の期間に相当する部分を取り出す。この方法は傾向変動を調整した SDP 風資料および外洋境界格子点での台風モデル風を組み込んだ表面風再解析資料 (NCEP 風資料) から空間補間と回帰式の適用を通じて瀬戸内海の海上・沿岸観測地点における観測相当風を求めたのち, 空間補間によって海上風分布を Fig. 2 の瀬戸内海領域で 1 時間ごとに推定するものである。傾向変動の調整法, 用いる風資料の詳細, 空間補間法の適用法, 回帰式の内容などは山口ら^[4]に述べている。

(3) 観測風海上風分布資料

山口ら^[3]は瀬戸内海の海上観測地点と沿岸観測地点における観測風資料および外洋境界地点での台風モデル風を組み込んだ表面風再解析・解析資料 (ECMWF 風資料) に対する加重 1 次補間法の適用によって 1983~2005 年の 23 年間 1 時間ごとの海上風分布資料を瀬戸内海領域で作成した。このほか, 同じ手法の適用により瀬戸内海西部海域および大阪湾・紀伊水道におけるそれぞれ 1978~1982 年 15 ケースのストーム (台風, 低気圧, 季節風) 時の 1 時間間隔海上風分布資料も作成した。格子間隔はいずれも 2 km である。これらから Table 1 の期間に相当する部分を取り出す。

2.2 波浪推算

畑田ら^[6]と同様に瀬戸内海を東部, 中部, 西部の 3 海域に分けて別々に波浪推算を行う。Fig. 3 は格子間隔 1 km の格子網を与える。東部海域と西部海域における波浪推算は, 各海域の南側境界代表地点 (図中の*印) に 1 点浅海モデルにより計算した 1 時間間隔の方向スペクトルを流入条件として与えると同時に, 瀬戸内海における各海上風分布条件のもとに格子点浅海モデルを用いて 2~3 日の台風期間ごとに時間間隔 1 分で実施する。海上風分布は空間に関して 1 km 間隔で, 時間に関して 1 分間隔で直線補間する。周波数の個数は 0.047~1 Hz を不等分割した 20 個, 方向の個数は 0~360° を 20° で等分割した 19 個 (中部海域), あるいは 10~20° で不等分割した 24 個 (西部海域) または 27 個 (東部海域) である。方向データ数の拡大は豊予海峡や友ヶ島水道と鳴門海峡における Garden Sprinkler 効果を軽減するためである。一方, 中部海域は陸地で囲まれた閉鎖領域として陸地境界での方向スペクトルを 0 とする。

3 種類の推算波高資料をそれぞれ MM5 風波高資料, SDP 風波高資料, 観測風波高資料と称する。

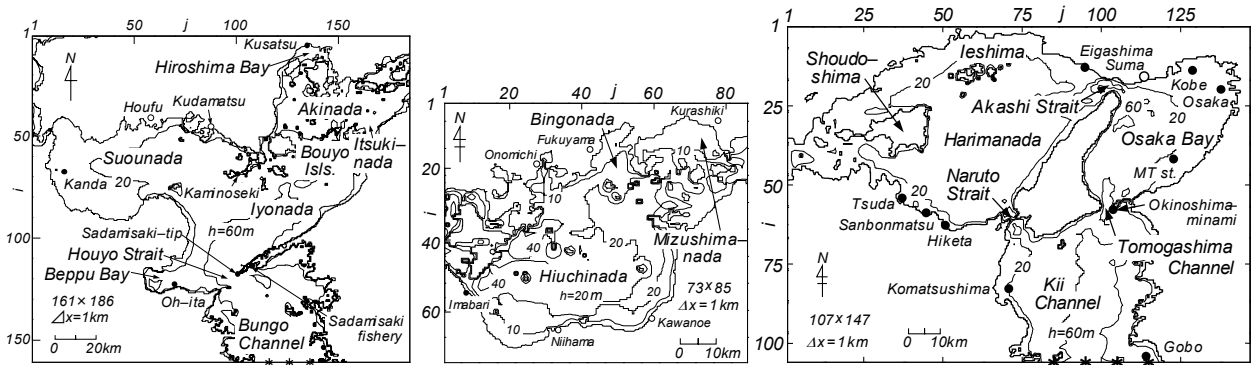


Fig. 3 Domain for wave hindcasting in the western, middle and eastern area of the Seto Inland Sea.

2.3 波浪観測資料と誤差指標の導入

観測資料を用いる波浪観測地点 (Fig. 3 に●印で記載) は西部海域の内海部では、荻田、上関、大分、草津 (または出島)、外洋波浪が到達する豊後水道では佐田岬先端、佐田岬漁港の7地点、中部海域では今治の1地点、東部海域では内海部播磨灘の津田、三本松、引田、江井ヶ島、大阪湾の神戸、大阪、MT局、外洋波浪が直接入射する紀伊水道の沖ノ島 (南)、小松島、御坊の10地点である。観測資料の時間間隔は2時間または1時間であり、観測資料の期間は地点ごとにかなりの長短を伴う。また、観測資料が得られる地点も1995年以前では多くない。

Fig. 4はT0514号時の推算波高および観測波高の時系列、ならびに推算波高と観測波高の散布図を西部海域西側奥に位置する荻田について例示する。この事例に限ってみれば、観測風海上風分布資料に基づく推算波高 (観測風波高: obsW と略記) やSDP風海上風分布資料に基づく推算波高 (SDP風波高: SDP) は観測波高とよく符合するのに対して、MM5風海上風分布資料に基づく推算波高 (MM5風波高: MM5) は最盛時以前の期間で観測波高より大きい。

時系列で示した推算波高と観測波高の符合の度合は散布図の中に与えるように、3つの誤差指標、すなわち相関係数 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 で表される。なお、観測波高資料の精度を考慮に入れて、外洋波浪の影響を受ける上記5地点で限界波高を $H_c=0.5$ m、内海発生波浪が卓越するこれら以外の地点で $H_c=0.3$ mとし、観測波高が H_c を上まわる時点のデータを対象とする。また、波浪状況が異なる地点間の誤差特性を同列に扱うために、2乗平均平方根波高誤差 σ_H を該当する台風期間中で H_c を越える観測期間の平均観測波高 $\bar{H}_{obs} (H_{obs} \geq H_c)$ で無次元化した $\tilde{\sigma}_H = \sigma_H / \bar{H}_{obs}$ を用いる。さらに各台風期間中の最大波高に関する誤差指標を最大波高比 $\tilde{H}_{max} = H_{max}^{cal} / H_{max}^{obs}$ で定義する。ここに、上側の添字 cal と obs はそれぞれ推算値および観測値を表す。

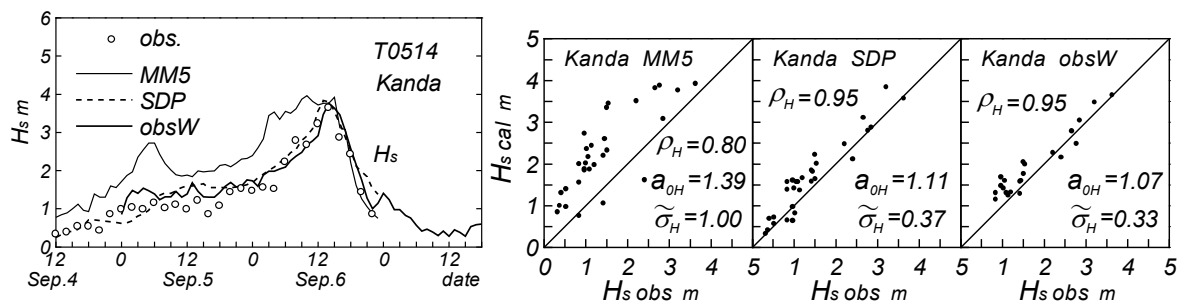


Fig. 4 Time series of hindcast- and measurement-based wave heights and their scatter diagram at Tokyo to-hyo station.

結局、誤差指標として ρ_H , a_{0H} , $\tilde{\sigma}_H$, \tilde{H}_{max} の 4 種類を採用し、各台風時に観測波高資料が得られる地点ごとにこれを求める。

3. 推算波高資料の精度の検討

3.1 全資料

Fig. 5 は 3 種類の推算波高資料より得た各 4 種類の誤差指標の頻度分布を示す。ケース数は 18 波浪観測地点における 1980~2005 年の 15 台風についての 97 である。図中には各誤差指標についての平均値 m と標準偏差 σ , 出現率 γ , および平均値 m を表す実線とこれに標準偏差を加減した $m \pm \sigma$ を表す点線を与える。出現率 γ は, 1 を上限値とする ρ_H に関して $\rho_H > 0.80$ の出現率, a_{0H} に関して $0.8 < a_{0H} < 1.2$ の出現率, 0 を下限値とする $\tilde{\sigma}_H$ に関して $\tilde{\sigma}_H < 0.4$ の出現率, \tilde{H}_{max} に関して $0.7 < \tilde{H}_{max} < 1.3$ の出現率とする。各誤差指標の m , σ , γ の添字による区別はとくにはしない。Table 2 は各誤差指標の平均値 m と標準偏差 σ および出現率 γ の一覧を示す。

まず相関係数 ρ_H をみると, SDP 風波高資料および MM5 風波高資料 (括弧内) の場合, ρ_H は 0.3 ~ 1 (0~1) の範囲にあつて平均値 $m=0.82$ (0.71), 標準偏差 $\sigma=0.15$ (0.21), $\rho_H > 0.8$ の出現率 γ は 0.73 (0.42) である。SDP 風波高資料の場合 ρ_H が 1 に近いケースが多く, 個々のデータのばらつきも小さいのに対して, MM5 風波高資料の場合 ρ_H の値が相対的に小さくばらつきも大きい。観測風波高資料の場合には, ρ_H の範囲は 0.4~1, 平均値は 0.85, 標準偏差は 0.13, 出現率は 0.78 であるから, SDP 風波高資料の場合に比べて精度面で一層良好な指標値を与える。

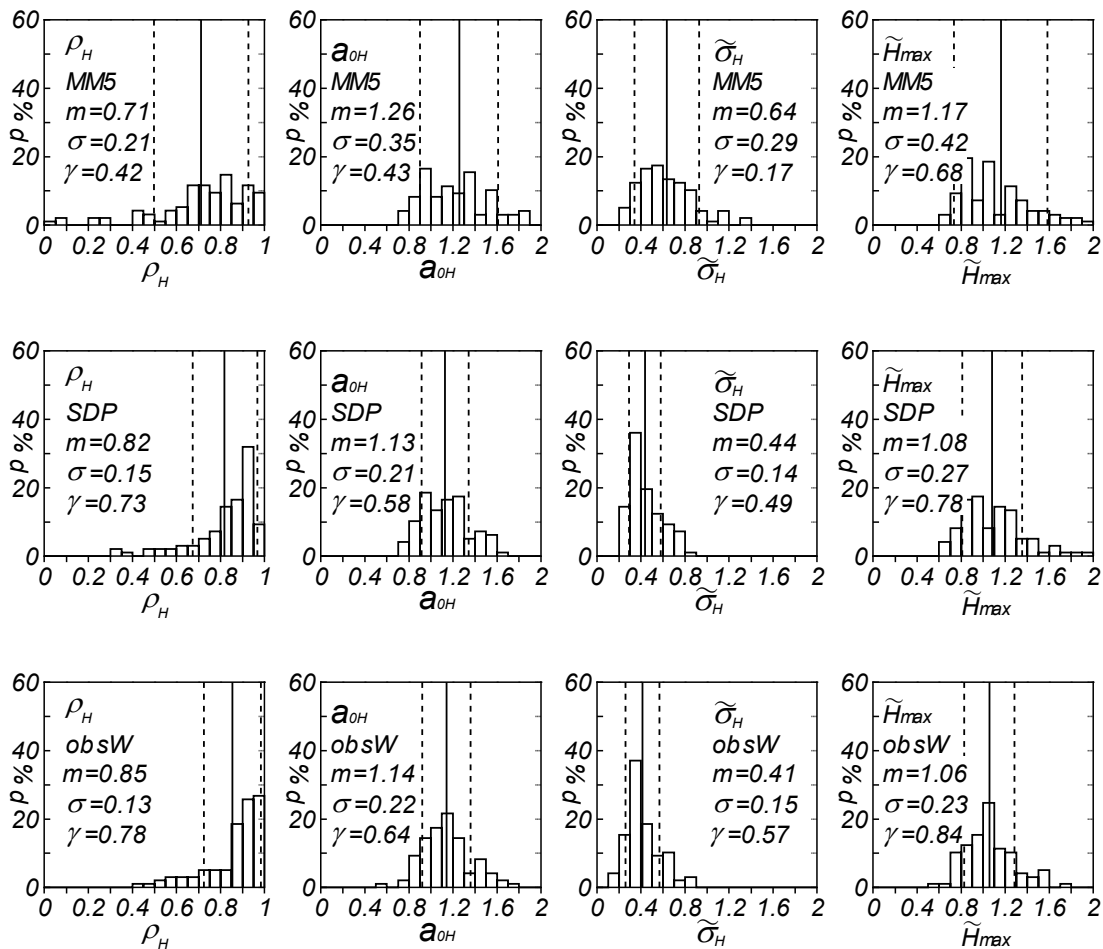


Table 2 Mean, standard deviation and range-limited occurrence rate for each wave heights-related 4 error indices at measurement stations in the Seto Inland Sea.

err. ind.	ρ_H			a_{0H}			$\tilde{\sigma}_H$			\tilde{H}_{max}		
	m	σ	γ	m	σ	γ	m	σ	γ	m	σ	γ
MM5	0.71	0.21	0.42	1.26	0.35	0.43	0.64	0.29	0.17	1.17	0.42	0.68
SDP	0.82	0.15	0.73	1.13	0.21	0.58	0.44	0.14	0.49	1.08	0.27	0.78
obs	0.85	0.13	0.78	1.14	0.22	0.64	0.41	0.15	0.57	1.06	0.23	0.84

勾配値 a_{0H} をみると、SDP 風波高資料および MM5 風波高資料（括弧内）の場合、 a_{0H} は 0.7~1.7 (0.7~1.9) の範囲にあって、平均値 $m=1.13$ (1.26)、標準偏差 $\sigma=0.21$ (0.35)、 a_{0H} が 0.8~1.2 の出現率 γ は 0.58 (0.43) をとる。 a_{0H} についても SDP 風波高資料では MM5 風波高資料に比べてより多くのデータが 1 のまわりに集まり、その変動幅も小さい。観測風波高資料の場合には、 a_{0H} の範囲は 0.5~1.8、平均値は 1.14、標準偏差は 0.22、出現率は 0.64 であるから、指標値は SDP 風波高資料の場合と同程度の値を示す。

無次元 2 乗平均波高誤差 $\tilde{\sigma}_H$ をみると、SDP 風波高資料および MM5 風波高資料（括弧内）の場合、 $\tilde{\sigma}_H$ は 0.2~0.9 (0.2~1.4) の範囲、平均値 $m=0.44$ (0.64)、標準偏差 $\sigma=0.14$ (0.29)、 $\tilde{\sigma}_H < 0.4$ の出現率 γ は 0.49 (0.17) であるから、 $\tilde{\sigma}_H$ についても MM5 風波高資料より多くの SDP 風波高資料が 0 に近い値をとることを表す。観測風波高資料では、 $\tilde{\sigma}_H$ の範囲は 0.1~0.9、平均値は 0.41、標準偏差は 0.15、出現率は 0.57 であり、SDP 風波高資料の場合よりやや良好な指標値を与える。

最大波高比 \tilde{H}_{max} をみると、SDP 風波高資料と MM5 風波高資料（括弧内）の場合、 \tilde{H}_{max} は 0.6~2.0 (0.6~2.0) の範囲、平均値 $m=1.08$ (1.17)、標準偏差 $\sigma=0.27$ (0.42)、 \tilde{H}_{max} が 0.7~1.3 の出現率 γ は 0.78 (0.68) である。SDP 風波高資料の \tilde{H}_{max} は多くのケースで MM5 風波高資料の場合より 1 に近い値を与える。観測風波高資料では、 \tilde{H}_{max} の範囲は 0.5~1.8、平均値は 1.06、標準偏差は 0.23、出現率は 0.84 であり、精度面で SDP 風波高資料よりやや良好な指標値を示す。

以上、 ρ_H 、 a_{0H} 、 $\tilde{\sigma}_H$ 、 \tilde{H}_{max} いずれの指標も SDP 風波高資料が MM5 風波高資料より高い精度をもつこと、および観測風波高資料は SDP 風波高資料よりさらに高い精度をもつことを示唆する。しかし、勾配値 a_{0H} の平均値や最大波高比 \tilde{H}_{max} の平均値が示すように、SDP 風波高資料および観測風波高資料のいずれも観測波高資料に比べて平均的に 10 %前後大きい波高を与える傾向にある。MM5 風波高資料の場合にはこの過大評価の傾向が一層顕著である。

以上の結果は個々の誤差指標についての結果であり、個々のケースの精度を検討したことに必ずしもならない。そこで、Table 3 は MM5 風波高資料、SDP 風波高資料、観測風波高資料に対して、各誤差指標に設けた制約条件を同時に満たすケース数を 2 種類の条件の場合に 97 ケースについて示す。表の第 1 行から下の行に向かうにつれて該当ケース数は当然減少する。推算波高資料の精度は 4 種類

Table 3 Number of typhoon cases which meet restrictive condition imposed on wave height error indices.

condition(1)	MM5	SDP	obs	condition(2)	MM5	SDP	obs
$\rho_H > 0.8$	36	76	82	$\rho_H > 0.65$	69	85	87
$0.8 < a_{0H} < 1.2$	15	52	67	$0.7 < a_{0H} < 1.3$	41	70	72
$\tilde{\sigma}_H < 0.4$	13	35	50	$\tilde{\sigma}_H < 0.5$	28	62	69
$0.7 < \tilde{H}_{max} < 1.3$	13	31	47	$0.6 < \tilde{H}_{max} < 1.4$	28	59	69

の制約条件を同時に満たすケース数によって判断することから、抽出ケース数は太文字で表した \tilde{H}_{max} の行に対する数値を見ればよい。これによると、厳しい選択条件にあたる condition(1)の場合、抽出ケース数は SDP 風波高資料および MM5 風波高資料(括弧内)で 31 (13)、緩やかな選択条件 condition(2)の場合 59 (28) であるから、全ケースでみた場合のこれらの数値は、SDP 風波高資料が全体として MM5 風波高資料より高い精度をもつことを統計的に支持する。また、観測風波高資料は SDP 風波高資料(括弧内)に比べて condition(1)と condition(2)でそれぞれ 47 (31) および 69 (59) であるから、SDP 風波高資料よりさらに高い精度をもつことを示唆する。

3.2 台風別資料

各推算波高資料の精度をより細かく検討するために、各資料に対する誤差指標を台風別に分類して、その平均値と標準偏差の特徴をみる。Fig. 6 は 3 種類の資料に対する誤差指標の平均値と標準偏差を台風別に与える。この場合、たとえば相関係数 ρ_H に関して平均値を $m(\rho_H)$ 、標準偏差を $\sigma(\rho_H)$ と表す。他の誤差指標についても同様である。対象台風の数は 9、各台風に含まれる地点数は 6~11 であり、T9313 号、T9612 号、T0514 号時に 6 と相対的に少ない。他の台風時には 7 以上である。台風別にみて SDP 風波高資料は多少の出入を除けば、MM5 風波高資料より全体として平均値 $m(\rho_H)$ 、 $m(a_{0H})$ 、 $m(\tilde{H}_{max})$ が 1 に、 $m(\tilde{\sigma}_H)$ は 0 に近い値を与え、標準偏差 $\sigma(\rho_H)$ 、 $\sigma(a_{0H})$ 、 $\sigma(\tilde{\sigma}_H)$ 、 $\sigma(\tilde{H}_{max})$ もより小さい値をとる傾向が明確に見出される。同様に、各指標の平均値と標準偏差は観測風波高資料が SDP 風波高資料より全体としてやや高い精度をもつことも示唆する。しかし、標本の大きさ(ケース数)が小さいことから、台風ごとに両者の関係は変動を伴う。

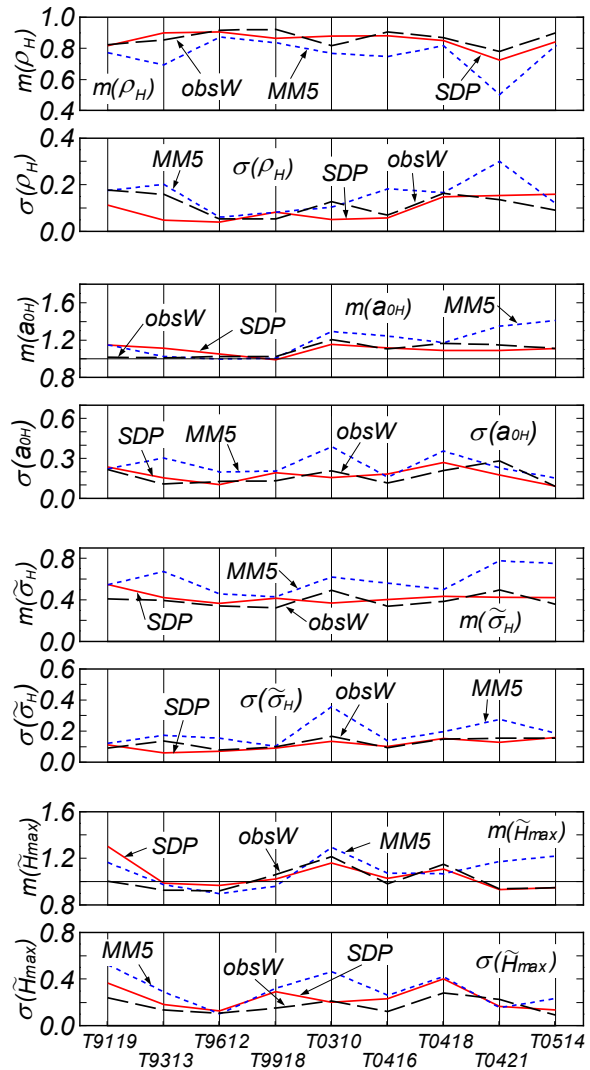


Fig. 6 Typhoon-grouped mean values and standard deviations of 4 wave heights error indices.

4. 結 語

本研究で得られた結果はつぎのように要約される。

①各誤差指標の頻度分布や平均値、標準偏差、さらに指定値以上 (ρ_H) あるいは以下 ($\tilde{\sigma}_H$) あるいは指定値の範囲内 (a_{0H} , \tilde{H}_{max}) の誤差指標の出現率は全体として SDP 風波高資料が MM5 風波高資料より高い精度をもつことを明確に示唆する。これはすでに山口ら^[7]によって明らかにされた SDP 風資料が

MM5 風資料より高精度を有するという特徴を反映するものである。また、観測風波高資料は SDP 風波高資料よりさらにやや高い精度をもつ傾向を示す。

②台風別にみても、①と同様の2つの知見が確認される。しかし、台風によっては資料（標本）数の減少のため各誤差指標の大小関係に多少のばらつきを生じることから、①の結論がやや不明瞭になる。

最後に、MM5 による瀬戸内海の海上風分布資料を快く提供戴いた山下隆男広島大学教授（大学院国際協力研究科）および李 漢洙広島大学助教（大学院国際協力研究科）、ならびに膨大な風・波浪観測資料を提供戴いた関係各機関に深く感謝します。

参 考 文 献

- [1] 岡田弘三・林 健次・磯崎一郎：内海における海上風推算手法の開発，海の研究，Vol.4，No.2，pp.91-99，1995.
- [2] 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.
- [3] 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巻，pp.106-110，2007.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 畑田佳男・山口正隆・野中浩一・大福 学：瀬戸内海における波浪推算に基づく確率波高の推定，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.126-131，2010.
- [7] 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巻，pp. S_1621-S_1626，2011.