

経験的台風モデルと局地気象モデルの風を用いた 瀬戸内海の高潮推算精度

Simulation of Storm Surge in Seto Inland Sea with Wind Field Estimated by
Empirical Typhoon Model and Mesoscale Model

河合弘泰¹・川口浩二²・大釜達夫³・友田伸明⁴・萩元幸将⁵・中野俊夫⁶

Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Tatsuo OHKAMA, Nobuaki TOMODA
Yukimasa HAGIMOTO, Toshio NAKANO

The marine surface wind field in recent major six typhoons over Seto Inland Sea was estimated by using 2D empirical typhoon models, the MASCON model, and the Mesoscale Model MM5 with GPV data and typhoon bogus. Among these models the MM5 estimated the wind field most precisely and improved storm surge estimation. The empirical model taking account of typhoon forwarding into the gradient wind equation and super gradient wind into the wind speed reduction coefficient gave the better wind speed variation with time near the typhoon center than the empirical model taking the sum of gradient wind and typhoon forwarding vectors. The MASCON model overestimated the effect of land topography on the horizontal wind component and consequently underestimated the wind speed.

1. はじめに

これまで内湾の高潮・波浪推算の実務では一般に、中心気圧、最大風速半径、移動速度をパラメタとする二次元の経験的台風モデルで海面気圧や海上風が推算されてきた。この経験的台風モデル自体は、陸上地形の影響を考慮しておらず、陸地のそばでも山地や島など陸地に突き刺さる非現実的な風場を与えてしまう。そのため、観測風との相関解析に基づく風速・風向の補正や MASCON モデルによる風場の調整がなされてきた。それでも、海上風の精度良い再現は難しく、これを外力とする高潮・波浪推算の精度にも限界があった（例えば、河合ら、2005）。

その一方で、全球あるいは日本周辺の広域をカバーする気象 GPV から細かな計算格子の気象データを作り、これに台風ボーガス埋め込んだものを初期値・境界値として、局地気象モデルで気象場を計算する方法も広まりつつある。この方法の導入によって海上風の推算精度が向上し、さらにこれを外力とする高潮や波浪の推算精

度も向上するという報告がある（山下ら、2004；河合ら、2006；中野ら、2006；吉野ら、2006）。ただし、気象 GPV、台風ボーガス、局地気象モデルの種類や使い方には様々なものがあり、それぞれの検証に用いられた台風や観測地点も限られているため、もう少し詳細な検討が必要である。その一方で、今後しばらくの間は経験的台風モデルや MASCON モデルも実務で使われ続けるので、これらのモデルの精度や問題点も再検討する必要がある。

以上のことを踏まえ、本研究ではまず、近年に瀬戸内海周辺に来襲した 6 つの台風を例に、経験的台風モデルと局地気象モデルによる風場を比較した。そして、これらを入力値として高潮を推算し、その精度を瀬戸内海周辺の多くの検潮所で得られた観測値により検証した。

2. 対象とする台風と海上風・高潮の推算方法

(1) 対象とする台風

本研究では、気象庁から気象客観解析値 RANAL が提供されている 1996 年以降に、瀬戸内海に顕著な高潮・高波をもたらした台風として、図-1 に示す 6 つを選んだ。実線で示す台風 0416 号、0418 号、0514 号、0613 号は、瀬戸内海の西方または西端に北東ないし北北東に向かって進んだものであり、瀬戸内海に顕著な高潮をもたらす典型的な台風である。一方、破線で示す 9709 号と 0410 号は、四国南岸に上陸して瀬戸内海を北西に向かって横切った、比較的珍しい台風である。

(2) 経験的台風モデルによる海上風の推算

海面気圧の分布は Myers の式によって与え、海上風

- | | | |
|-------|------|--------------------------------|
| 1 正会員 | 修(工) | (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長 |
| 2 正会員 | 博(工) | (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究官 |
| 3 正会員 | 工修 | 国土交通省北陸地方整備局伏木富山港湾事務所長 |
| 4 | | 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所調査課長 |
| 5 | | 国土交通省九州地方整備局宮崎港湾・空港整備事務所保全課 |
| 6 | 修(理) | (財)日本気象協会首都圏支社調査部 |

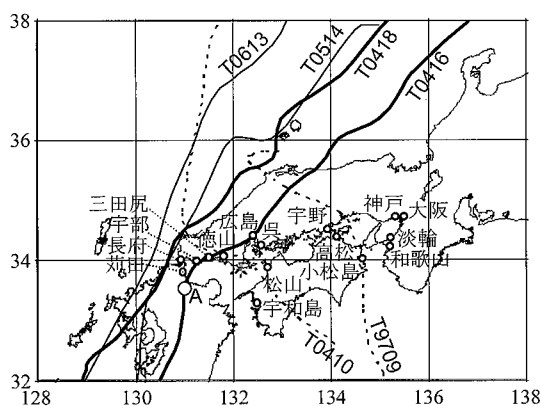


図-1 対象とした台風のコース

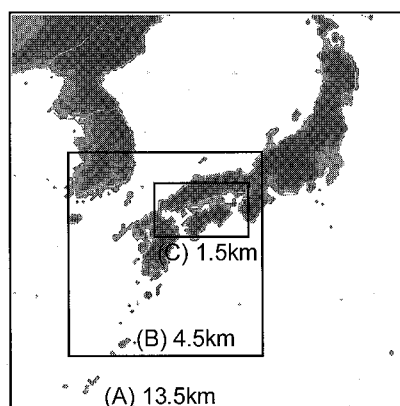


図-2 計算の対象領域と格子間隔

は以下に記す2種類の方法で求めた。

その一つは、等圧線上の気圧傾度力、コリオリ力、遠心力のつり合いによる傾度風成分と、台風の移動の効果とをそれぞれ求めて、これらをベクトル合成するものである。傾度風成分の風速 U_1 、場の風成分の風速 U_2 は、

$$U_1 = C_1 \left\{ -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \right\} \quad (1)$$

$$U_2 = C_2 (U_1 / U_{1,r_0}) V_T \quad (2)$$

で与えられる。ここに、 C_1 と C_2 は風速低減係数（本研究では0.66）、 r は中心からの距離、 f はコリオリのパラメタ、 Δp は気圧深度、 ρ_a は大気密度、 r_0 は最大風速半径、 U_{1,r_0} は $r=r_0$ における U_1 、 V_T は台風の進行速度であり、傾度風成分の吹き込み角は30度とした。このモデルで移動する台風の最大風速の位置は、中心から見て真右よりやや後方にある。以下ではこのモデルをPRMと記す。

もう一つの方法は、傾度風の力の釣り合い式に台風の移動の効果を取り込むとともに、超傾度風を考慮するために風速低減係数を台風の中心からの距離の関数で与えるもの（Mitsuta・Fujii, 1987）である。その風速 W は、

$$W = C \left\{ -\frac{rf - V_T \sin \beta}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf - V_T \sin \beta}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \right\} \quad (3)$$

$$C = C_\infty + (C_p - C_\infty) \left(\frac{X}{X_p}\right)^{k-1} \exp \left\{ \left[1 - \frac{1}{k} \right] \left[1 - \left(\frac{X}{X_p}\right)^k \right] \right\} \quad (4)$$

$$C_p = \min \left\{ \frac{2}{3} [1 + 10^{(0.02314p - 1.95)}], 1 \right\} \quad (5)$$

で与えられる。ここに、 C は風速低減係数、 $C_\infty=2/3$ 、

$k=2.5$ 、 $X=r/r_0$ 、 $X_p=0.5$ 、 β は台風の中心から見た方向である。本研究では、吹き込み角も中心からの距離の関数で与え、風速低減係数の最大値 C_p は1を超えないように制限した。このモデルで移動する台風の最大風速の位置は、中心から見て真右にある。以下ではこのモデルをSGWと記す。

(3) MASCON モデルによる海上風の推算

SGWの風場を初期値とし、MASCONモデルで風場に陸上地形の影響を考慮した。その対象領域は図-2の領域(C)で、水平方向の格子間隔は1.5kmとし、鉛直方向には60層をとった。MASCONモデルでは、風速の補正量の鉛直成分と水平成分にそれぞれ重み（補正の固さを決めるパラメタ）を設定するため、得られる解はこの重みの比に依存する。本研究では、この比を従来のように鉛直方向と水平方向の格子間隔の比とした場合（以下ではMAS-1）と、その1/10とした場合（MAS-2）を検討した。

(4) 局地気象モデルによる海上風の推算

局地気象モデルにはMM5を用い、空間分解能が約20kmの気象庁RANALに台風ボーガスを投入したものをその初期値・境界値に与えた。MM5にはもともと地衡風近似に基づく台風ボーガスが付属されているが、本研究では傾度風近似に基づく気象庁ボーガスを改良したもの（Ohsawaら, 2006）を採用した。

MM5の計算領域は図-2の領域(A)～(C)である。領域(A)と(B)は双方向に結合した計算を行い、領域(C)は領域(B)の計算結果を初期・境界条件に与えて計算した。MM5の計算では時間の経過とともに台風の進路や強度の誤差が大きくなるので、あらかじめ気象庁ベストトラック解析の中心位置と中心気圧に対応した台風ボーガスを埋め込んだ気象場を3時間ごとに作っておき、この気象場に対してナッジング法による4次元同化を行った。

以上の方法を以下では単にMM5と記す。

(5) 高潮推算の方法

高潮推算には実務で使われている単層・非線形長波方程式モデルの一つ（運輸省港湾技術研究所，1996）を用いた。その計算領域は図-2の領域(B)と(C)であり，領域(C)では MASCON モデルや MM5 の計算格子と 1.5 km 間隔で統一し，空間的な内挿による誤差の蓄積を避けた。

3. 各モデルで得られた海上風の特徴と推算精度

(1) 風速の経時変化

図-3 は台風 0416 号，0418 号，0514 号を例に，荊田（位置は図-1 を参照）沖合の風速の経時変化を示す。これらのうちで MM5 の風が観測値を最もよく再現している。

台風の最大風速半径の内側に入る地点では一般に，風速の経時変化に 2 回のピークが現われる。例えば台風 0416 号時の観測値でも，台風目の前方に対応する 1 回目のピーク（図の①）は 25 m/s を超え，2 回目（②）はこれよりやや小さい。この観点から経験的台風モデルの PRM と SGW を比較すると，SGW の方が観測値をよく再現している。ただし，SGW はあらゆる台風に対してこれほど良く再現できるわけではなく，台風 0418 号では PRM と同様に風速のピークが過大になっている。なお，この台風では MM5 も観測値を少し上回っている。

本研究で対象とした全ての台風を通じて，MASCON モデルで調整した風場は全体的に風速が小さくなった。これまで実務でよく使われてきたパラメタ設定の MAS-1 は，本研究で対象としたモデルで最小の風速を与えている。鉛直成分の補正を緩めた MAS-2 は，MAS-1 より初期風の SGW に近い風速を与えた。なお，MAS-1 と MAS-2 の間のパラメタ設定についても調べたところ，パラメタ設定と得られる風速が単純には比例関係にはない場合もあった。質量保存則を満たす解の空間的な収束のしかたの違いによるものと思われる。

(2) 海上風の平面分布

台風 0416 号の中心が周防灘の南（図-1 の A）に達したときの各モデルによる海上風の平面分布を図-4 に示す。25 m/s 以上の風域が，PRM では周防灘の東端にかかっているが，SGW では中ほどまで達している。また，MM5 では周防灘の中ほどまで達している他に，燧灘にも帯状に現れている（図の↑印の先）。

一方，MAS-1 の風場では，風上側と風下側の両方が陸に囲まれた燧灘や大阪湾において，風速が著しく小さい。また，豊後水道を北上して来た風が，陸上地形を避けて周防灘と広島湾に分岐する流れになっている。ところが，MM5 の風場には，このような陸上地形による風向の変化が見られない。陸地の近傍を除けば，むしろ陸

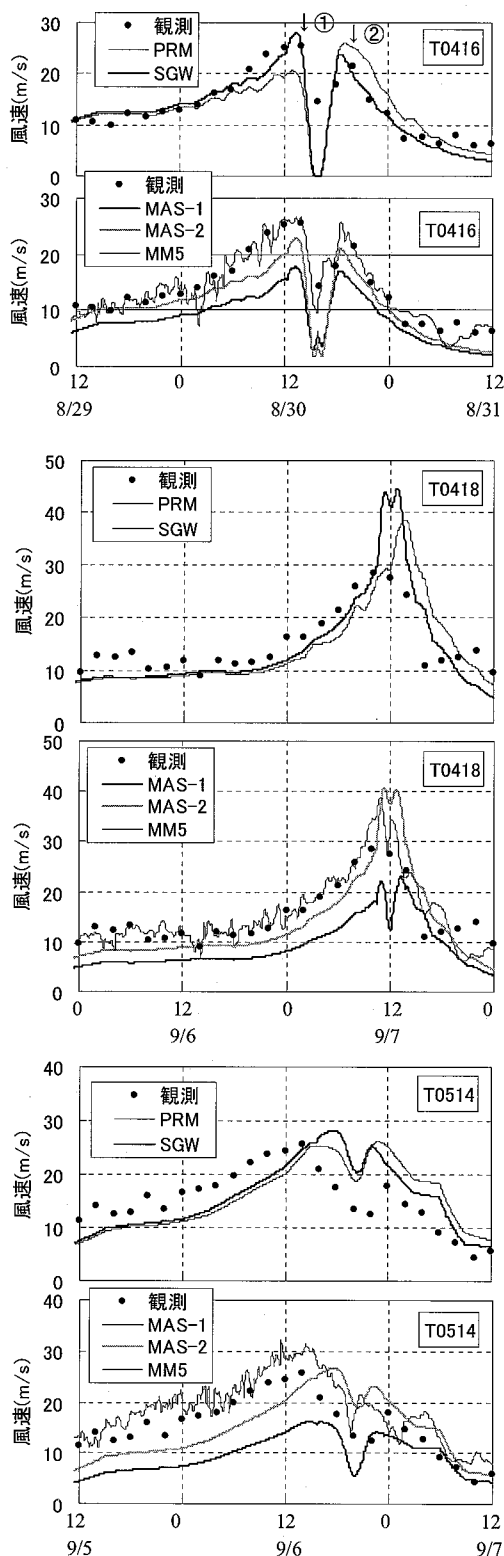


図-3 荊田における風速の経時変化

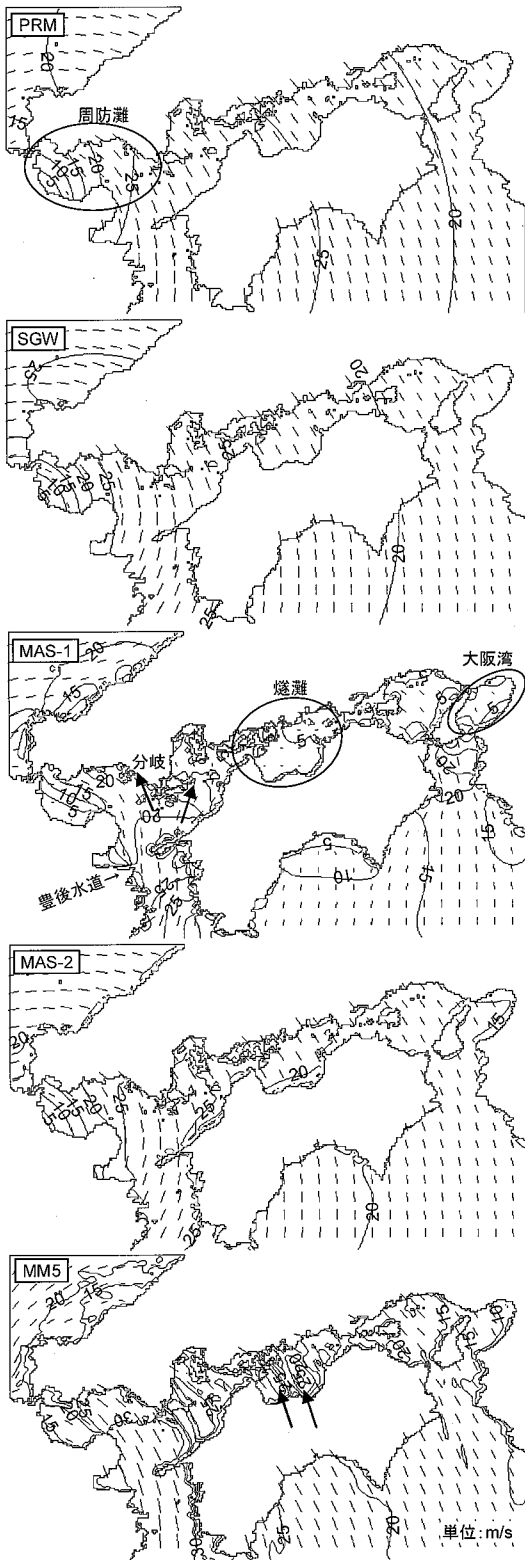


図-4 台風 0416 号の海上風の平面分布 (8 月 30 日 15 時)

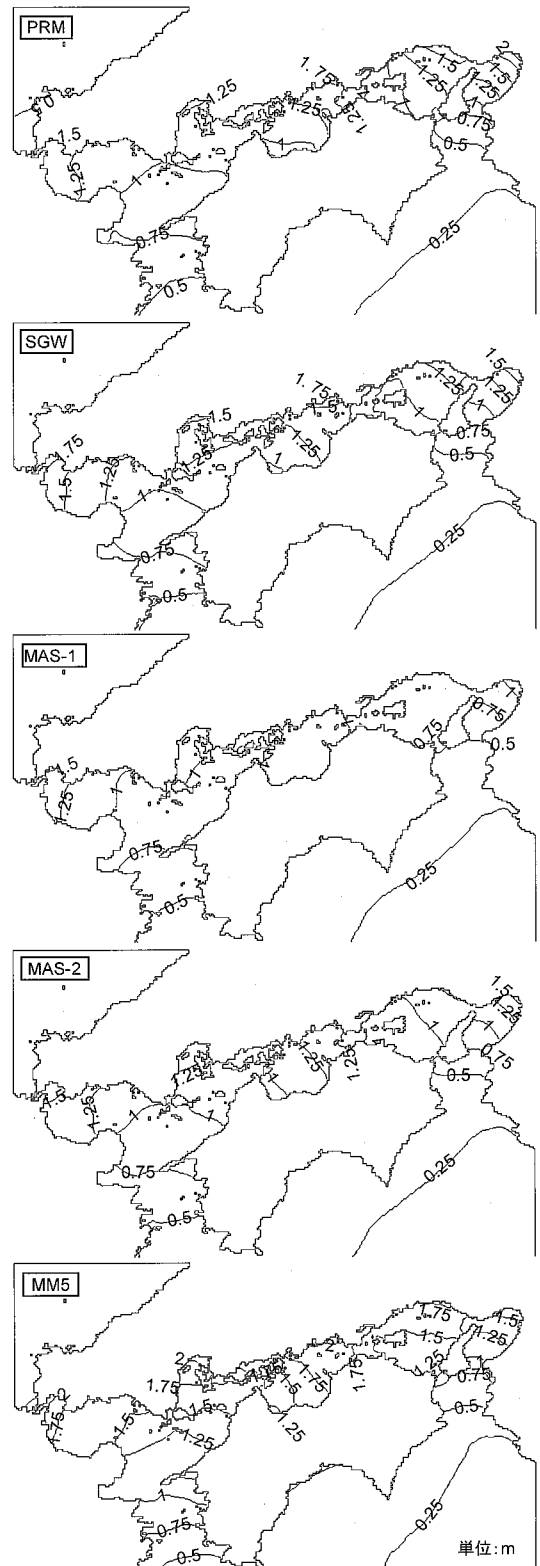


図-5 台風 0416 号の最大高潮偏差

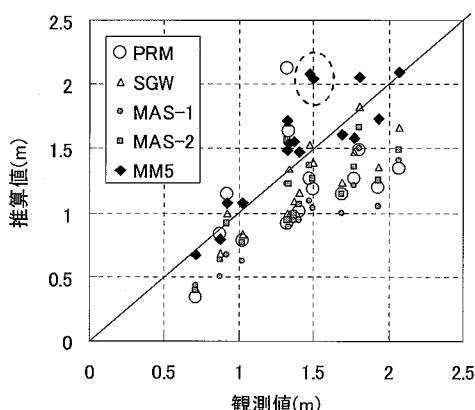


図-6 台風0416号の最大高潮偏差の観測値と推算値

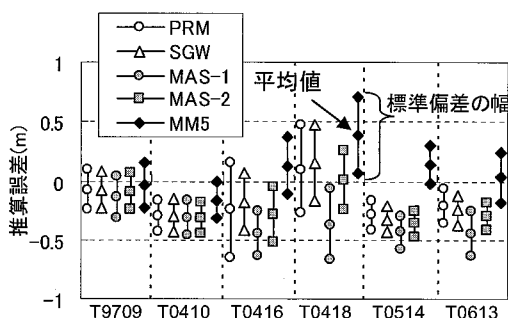


図-7 各台風における最大高潮偏差の推算誤差

上地形を考慮しない経験的台風モデルPRMとSGWの風場の方がMM5の風場に近い。図-3で示したようにMM5の風場は現実の風場をほぼ正確に再現していると考えられるので、MAS-1では風場の調整において鉛直方向の補正が厳し過ぎると思われる。一方、MAS-2では、MAS-1に比べてMM5に近い風場になっている。

4. 高潮偏差の比較

図-5は台風0416号を例に、それぞれの海上風を用いて得られた最大高潮偏差の平面分布を示す。経験的台風モデルの間にも、PRMでは最大高潮偏差が周防灘より大阪湾で大きく、SGWではその逆と、平面分布のパターンに違いがある。SGWの最大高潮偏差は、値としては全体的にMM5より小さいが、平面分布のパターンはMM5に似ている。これは、図-3、4で示したように、SGWの風がMM5の風に近いことに対応している。MAS-1、MAS-2の最大高潮偏差はSGWよりさらに小さい。

図-6は台風0416号を例に、瀬戸内海の各地点(図-1を参照)の最大高潮偏差の推算値を観測値と比較したものである。PRMの推算値は平均的に見て観測値より小さく、しかも観測値の周りに大きくばらついている。こ

れに対しMM5の推算値は、平均的に見ても観測値に近く、ばらつきも小さくなっている。ただし、図に破線円で示すように、観測値より約0.5m大きな高潮偏差が得られた地点もある。風や高潮の推算の空間解像度を上げた検討の余地があると思われる。

図-7は、他の台風も合わせて、最大高潮偏差の推定誤差(=推算値-観測値)をまとめたものである。MM5の海上風を用いることで、PRM、SGW、MAS-1、MAS-2よりも全体的に精度良く高潮が推算されている。なお、台風0418号でPRM、SGW、MM5の推算値が過大になっているのは、図-3で示したように風速が大きくなり推定されたことによるものと考えられる。

5. おわりに

本研究を通じて、局地気象モデルによって内湾海上風の推算精度を全体的に高めることができ、これが高潮推算精度の向上にもつながることを示すことができた。また、経験的台風モデルでも風速のピークを比較的よく再現できることがあること、MASCONモデルでは初期の風場を水平方向に補正し過ぎることで風速が弱まる傾向があること、なども示すことができた。

今後も他の台風や他の海域に対して海上風推算モデルの妥当性を確認するとともに、高潮推算モデル自体に関する検討も進めたい。

参考文献

- 運輸省港湾技術研究所(1996):津波・高潮数値計算システム取扱説明書(プログラムマニュアル), 239p.
- 河合弘泰・本多和彦・富田孝史・柿沼太郎(2005):2004年に発生した台風の特徴と高潮の予測・再現計算, 港湾空港技術研究所資料, No. 1103, 34p.
- 河合弘泰・中野俊夫・川口浩二・松浦邦明(2006):IAUデータ同化手法のメソ気象モデルへの導入と台風9918号の海上風・波浪・高潮の追算, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 381-385.
- 中野俊夫・大澤輝夫・吉野 純・益子 渉・河合弘泰(2006):台風ボガスの高度化による数値予報モデルを用いた海上風推算手法の精度向上, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1286-1290.
- 山下隆男, 西口英利, 金 庚玉, 玉田 崇(2004):台風の風域場と降雨場の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1241-1245.
- 吉野 純・村上智一・林 雅典・安田孝志(2006):高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1276-1280.
- Mitsuta, Y. and T. Fujii (1987):Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 37, Part 4, No. 329, pp. 169-185.
- Ohsawa, T., T. Nakano, K. Matsuura and K. Hayashi (2006):Introduction of a JMA-type typhoon bogus scheme into MM5 to improve hindcasting of coastal sea surface winds, The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering, Journal of Wind Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 193-196.