

潮汐・高潮・波浪結合モデルとメソ気象モデルWRFを用いた 瀬戸内海における高潮再現計算に関する研究

Numerical Study of Storm Surge Hindcast Simulations in the Seto Inland Sea
by Surge-Wave-Tide Coupled Model and Mesoscale Atmospheric Model WRF

安田誠宏¹・山口達也²・金 洙列³・島田広昭⁴・石垣泰輔⁵・間瀬 肇⁶

Tomohiro YASUDA, Tatsuya YAMAGUCHI, SooYoul KIM, Hiroaki SHIMADA,
Taisuke ISHIGAKI and Hajime MASE

Storm surges generated by Typhoon T0416 and T0418 in the Seto Inland Sea were hindcasted by the SuWAT (Surge-Wave-Tide coupled model). To investigate the effects of meteorological data considered a topography around the sea on storm surges, the data obtained from WRF (the Weather Research and Forecasting model) was compared with it from a parametric model (Fujii and Mitsuta model). Our results indicate that storm surges simulated by the combination of WRF data and tidal variations showed better agreement with the observations than those by the analytical model with constant water level.

1. はじめに

2004年には10個の台風が日本に上陸し、各地に被害をもたらした。台風16号来襲時には、瀬戸内海で顕著な高潮が発生し、高松で潮位246cm、宇野で潮位255cmを観測するなど、各地で既往最高潮位を更新した。さらに、台風18号来襲時には広島で潮位268cmを観測し、既往最高潮位を更新した。瀬戸内海は潮の干満差が大きく、季節によっては3m以上にもなる。2004年の高潮災害は、夏の大潮・満潮が重なったために被害が助長された。

海岸護岸および堤防の設計では、既往最高潮位、もしくは伊勢湾台風級のモデル台風による最大高潮偏差に期望平均満潮位を足したものが用いられている。しかし、潮汐変動が大きい海域で高潮による海面上昇量を適切に予測するには、潮汐と高潮の相互干渉を考慮する必要がある。潮汐が高潮に与える影響を細かく調べた研究は金ら(2007)による研究があるが、計算コストがかかるとの理由から、一般的には潮汐を考慮した検討はあまり行われていない。また、ほとんどの場合、気象場の解析には2次元台風モデルが用いられる。最近では、河合ら(2007)や吉野ら(2006)によって局地気象モデルMM5を用いて瀬戸内海沿岸の高潮計算を行った研究があるが、次世代メソ気象モデルであるWRF(Weather Research and Forecasting model)を用いて、その有用性を検討した研究

は、海岸工学分野ではまだない。

本研究の主要な目的は、潮汐の干満差が大きい瀬戸内海沿岸を対象とし、潮汐が高潮に与える影響を明らかにすることと、入力気象場の違いによって、高潮計算にどのような影響があるのかを明らかにすることである。まず、潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮できる結合モデルSuWAT(Surge-Wave-Tide coupled model)を用いて、台風16号および台風18号来襲時の高潮再現計算を潮汐条件を変えて行い、潮汐変動が高潮に及ぼす影響について検討する。次に、気象場の計算にWRFを用いて、気圧および風速・風向をSuWATの入力条件にできるようにモデルを改良し、高潮再現計算を行って、台風モデルを用いた場合との違いについて比較・検討する。

2. 潮汐・高潮・波浪結合モデルSuWAT

本研究では、金ら(2007)による潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮した双方向結合モデルSuWATを用いた。この計算モデルは、潮汐計算モジュール、高潮計算モジュールおよび波浪計算モジュールの、3つの主要モジュールから成っている。図-1にSuWATの計算フローを示す。高潮計算モジュールでは、非線形長波モデルにradiation stressによる項を加えたものを基礎式として用いている。潮汐計算モジュールでは、Matsumotoら(2000)による日本周辺海洋潮汐モデルを用いている。波浪計算モジュールでは、第3世代波浪推算モデルであるSWANを用いている。潮汐の計算は、あらかじめ開境界における潮汐変動を与え、計算領域の潮汐変動を初期条件の影響がなくなるまで調整する。その後、気象モデルWRFによって解析された気象場をそのまま読み込むか、台風モデルによって台風による気圧低下と風を海面に作用させて、高潮の計算を行う。高潮計算中も潮位は変動している。

- | | |
|--------------|--------------------------|
| 1 正 会 員 博(工) | 京都大学助教 防災研究所 |
| 2 学生会員 | 関西大学大学院 工学研究科ソーシャルデザイン専攻 |
| 3 正 会 員 博(工) | 鳥取大学助教 工学部社会開発システム工学科 |
| 4 正 会 員 博(工) | 関西大学准教授 環境都市工学部都市システム工学科 |
| 5 正 会 員 工博 | 関西大学教授 環境都市工学部都市システム工学科 |
| 6 正 会 員 工博 | 京都大学教授 防災研究所 |

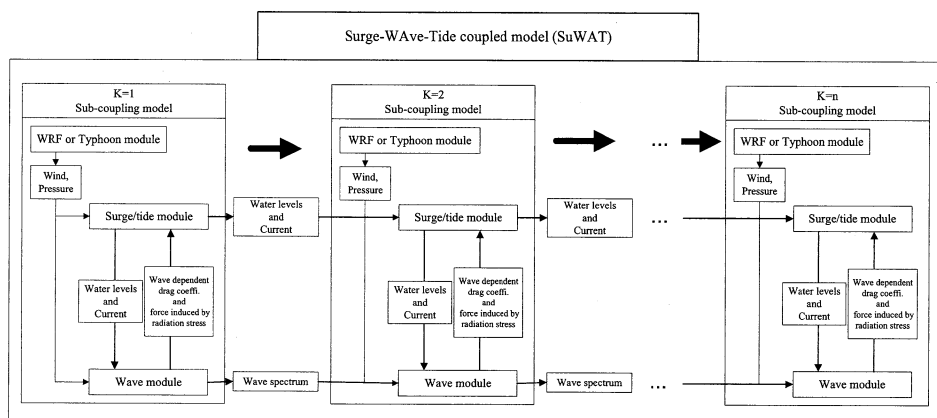


図-1 SuWATの計算フロー

3. 気象場の計算

(1) メソ気象モデルWRF

気象場の計算にメソ気象モデルWRFを用いた。WRFはアメリカ大気研究局(NCAR: National Center for Atmospheric Research)によって開発された局地気象予測モデルである。MM5の次世代モデルと位置づけられ、高次の差分スキームや最新の物理モデルが採用されており、気象状況の再現に有力なツールとなると期待されている。WRFが高潮計算の外力場として用いられた事例は少ないが、地表面形状を考慮した計算ができることや、入力データに客観解析データを用いていることなどから、台風モデルに比べて、より気象の実態に即した気象場の計算ができると考えられる。WRFの入力データには1度毎、6時間毎のNCEPの客観解析データ(FNL: Final Analysis)を用い、WRFによる解析で気象場をダウンスケーリングした。その解析結果を順次SuWATに読み込ませ、外力条件として海面に作用させる。

(2) 台風モデル

気象モデルによる計算との比較のために、2次元台風モデルによる気象場の計算を行った。台風モデルは計算コストが非常に小さく、パラメータの設定によって簡便に扱うことができるため、これまで多くの高潮研究に用いられてきた。しかし、地表面形状を無視した値を出力するため、その出力値には非現実的な状況も含まれることもある。台風モデルとしては、藤井・光田モデル(1986)を用い、気圧場はMyersの式、風場にはSGW(Super Gradient Wind)を用いた。台風半径(最大風速半径)は、台風モデルによる気圧と気象庁により公開されている周辺の気圧観測値を、最小2乗法により最適にフィットするように設定した。

4. 瀬戸内海への適用

(1) 解析条件

瀬戸内海沿岸を対象に、潮汐変動が高潮へ及ぼす影響

について調べるため、2004年の台風16号および18号が来襲した際の高潮の再現計算を行った。対象地域とした瀬戸内海沿岸は大小様々な島が点在しており、気象場の精度良い再現が難しい。外洋から瀬戸内海の広島および高松周辺までを対象とし、格子間隔比3:1で4段階のネスティングを適用した地形データを用い、MPIによって各領域を並列計算した。潮汐計算の安定を図るため、計算は台風接近の10日前から開始した。検討地点は図-2中の第4領域に●印で表した、宇野、高松、広島および松山であり、実際の各地点での観測値と本手法による計算値について比較する。各計算領域の諸元を表-1に示す。

高潮に及ぼす潮汐変動の影響を検討するため、潮位変動条件、平均潮位条件、高潮位条件の3つの条件で解析を行った。ここで、高潮位条件は各観測地点で最大潮位を観測した時の天文潮位を与えた。Domain4-1の広島周辺海域ではT0416来襲時には190cm、T0418来襲時には90cmとした。Domain4-2の岡山周辺海域ではT0416来襲時には130cm、T0418来襲時には100cmとした。

瀬戸内海では波浪によるセットアップの影響はほとんどなかったため、本研究では高潮のみの計算を行い、風速抵抗係数は本田・光易(1980)の式を用いた。メソ気象モデルWRFと台風モデルを用いた解析を同様の条件で行い、観測値と比較した。なお、WRFを用いた解析については、計算簡略化のために第1領域と第3領域にのみWRFのアウトプットを用い、その他の領域では補完計算によって気象場を再現した。

(2) 気圧の解析結果

WRFを用いた場合と、台風モデルを用いた場合の気圧場の解析結果について比較する。図-3(a)にT0416来襲時の高松での解析結果を、図-3(b)にT0418来襲時の広島での解析結果を示す。

両者ともWRFによる気圧の解析結果は観測値と比べて、低下および増大傾向は一致している。気圧の低下量は(a)図ではWRFの方はピーク値の誤差が5hPa程度ある

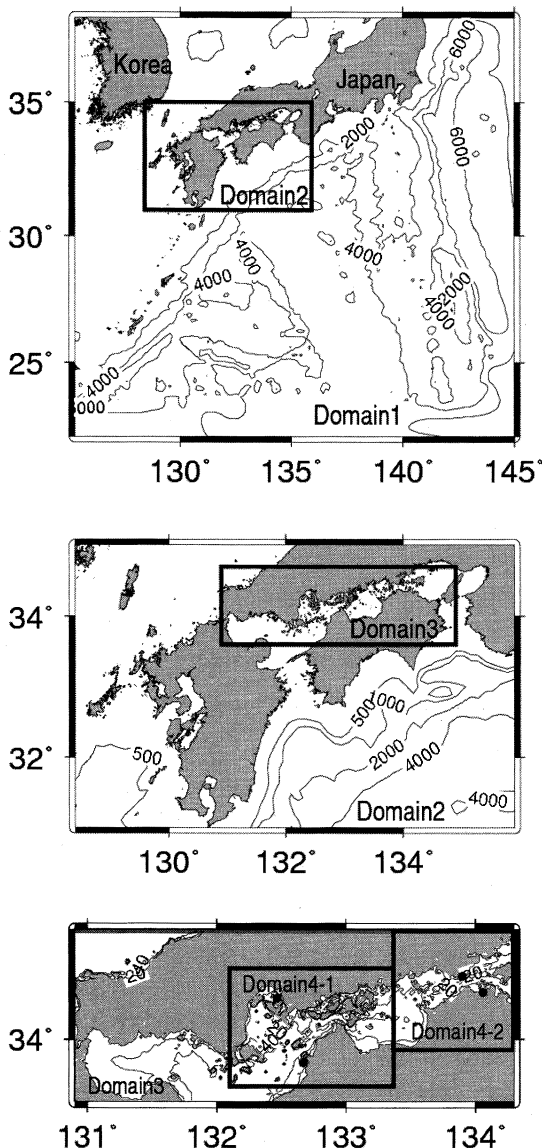


図-2 ネスティングした計算領域

ものの、台風モデルよりも5hPa程観測値に近いが、(b)図では観測値に比べてピーク値が10hPa程高くなっており、WRFの気圧が低下していない。一方、台風モデルでは、観測値に比べてシャープな気圧低下と増大をしているが、時系列的には一致していない。

(3) 風速・風向の解析結果

WRFを用いた場合と台風モデルを用いた場合の風場の解析結果について検討する。図-4に示すように、台風モデルでは観測値に比べて風速は20m/s程度過大評価され、かなり大きい値を示したが、WRFでは誤差が10m/s以内に収まり観測値に近い値となった。風向は、いずれのモデルでも全体的な傾向は一致していた。しかし、図-5に示すように、台風が接近し、傾度風の影響が現れる

表-1 計算領域の諸元

Domain	Range of domain	Grid size (m)	Num.grids
1	125.2E-143.9E 23.2N-37.3N	$\Delta x = 12150$ $\Delta y = 12150$	144×122
2	128.4E-135.9E 31.0N-35.0N	$\Delta x = 4050$ $\Delta y = 4050$	172×108
3	130.9E-134.3E 33.6N-34.7N	$\Delta x = 1350$ $\Delta y = 1350$	234×96
4-1	132.10E-133.37E 33.70N-34.45N	$\Delta x = 450$ $\Delta y = 450$	267×186
4-2	133.37E-134.29E 33.93N-34.69N	$\Delta x = 450$ $\Delta y = 450$	186×187

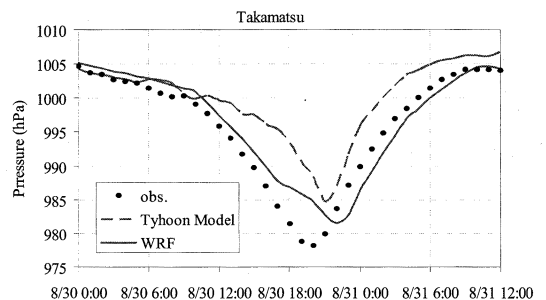


図-3(a) 気圧 (T0416, 高松)

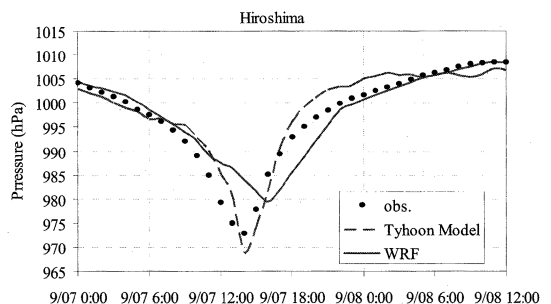


図-3(b) 気圧 (T0418, 広島)

と、観測値に比べて時間的に風向の変化に誤差が大きくなった地点があった。台風モデルでは地表面形状が考慮されていないのに対して、WRFでは考慮されている。そのため、地表面の粗度により風速が低下し、風向の再現が台風モデルよりも観測値に近い精度の良い結果になったと推測できる。

(4) 潮位の解析結果

図-6(a)～(c)にWRFを用いた潮位の解析結果を、図-7(a)～(c)に台風モデルによる解析結果を示す。それぞれT0416来襲時の松山および広島、T0418来襲時の松山での結果である。平均潮位条件(MWL)と高潮位条件(HWL)の潮位の計算結果については、高潮偏差のみの解析に天文潮位を足したものを示した。変動潮位条件(Tide)での解析では底面粗度一様としているので、天文

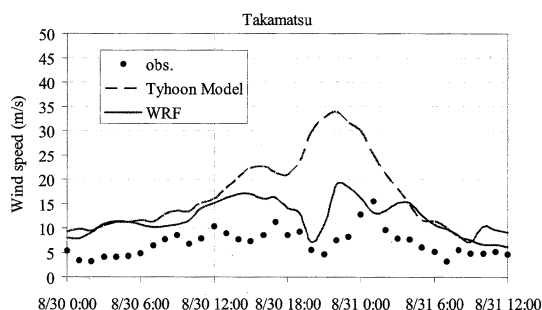


図-4(a) 風速 (T0416, 高松)

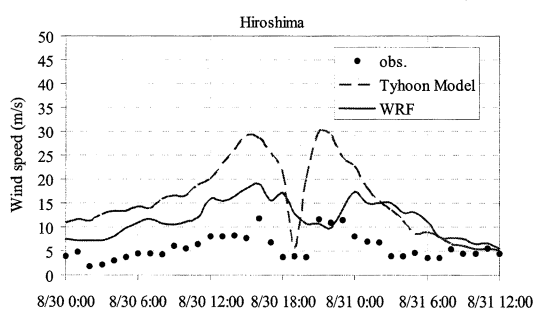


図-5(a) 風速 (T0416, 広島)

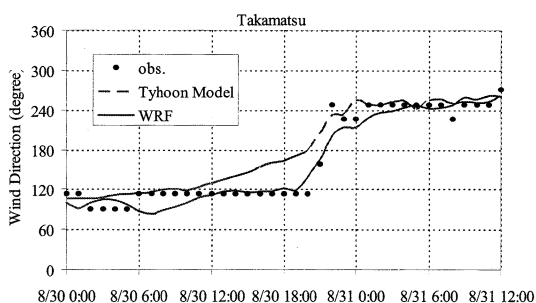


図-4(b) 風向 (T0416, 高松)

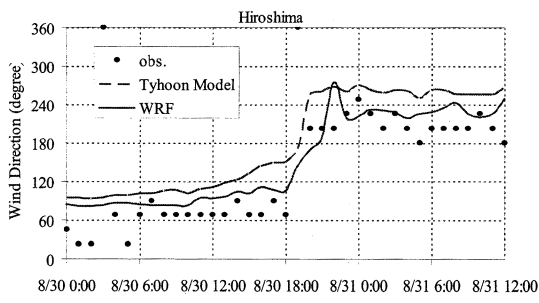


図-5(b) 風向 (T0416, 広島)

潮の極小値が局所的には再現できていない。今回は領域全体の値を妥当にすることに主眼を置いたため、このような結果となった。解像度が450m×450mと粗いため、換潮所の位置が再現できていない可能性もある。

図-6によると、WRFを用いた場合、実線で示した変動潮位条件(Tide)で解析を行った結果は、観測値と比べて全体的によく一致している。T0416号来襲時の干潮の時にやや小さいが、満潮時の再現性は誤差がほとんどない。一般的に用いられている平均潮位条件(MWL)での計算結果(破線)は、高潮発生時に潮位の上昇が十分でなく、変動潮位の解析結果に比べて観測値との誤差が1m程ある地点もある。高潮位条件(HWL)での計算結果(一点鎖線)は、平均潮位条件の結果とよく似た傾向を示しているが、ピーク時にMWL条件よりもさらに小さい値となった。高潮偏差自体の計算値が、3つの潮位条件の中で最も小さくなったためであり、これは、水深が大きいために吹き寄せによる効果と底面摩擦による影響が小さくなったことが要因と考えられる。

一方、図-7の台風モデルを用いた解析結果については、いずれの潮位条件についても、観測値と比べて再現性はよくない。WRFを用いた場合に最も再現性がよかった潮位変動条件での結果は、観測値に比べて大きめになったり、小さめになったりと傾向がまちまちで、誤差も最大で1mを超える。平均潮位条件の場合、WRFを用いた場合よりも、ピーク時の潮位が地点によっては80cm程大きめに算出されている。これは、4.(2)および(3)で述べたように、気圧のシャープな低下に加え、非常に大き

い風速、風向の急激な変化等の、台風モデルが元来持っている気象場の特徴によって高潮の発達が促進されたものと考えられる。また、図に示していないが、偏差の結果ではWRFを用いた結果では30cm程度の過小評価、台風モデルを用いた結果では40cm程度の過大評価になる傾向があった。WRFを用いた結果では偏差の発達過程が時系列的によく合っており、台風モデルを用いた結果では高潮のピーク時の直前に急激に発達する傾向がある。

台風モデルと平均潮位条件での再現計算では、ある地点の高潮の再現結果だけをみて、全体を一致していると見なすことは危険である。高潮位条件での計算結果は、台風モデルの場合においても、高潮のピーク時にかなり小さめの値を与える結果となった。

全ケースを通じて、潮汐変動を考慮してメソ気象モデルWRFを用いた場合には、台風モデルを用いた場合よりも、潮位の計算結果の再現性が高いことがわかった。また、瀬戸内海のような潮汐の干満差が大きな海域においては、潮汐変動を考慮して、かつWRFを用いることで、適切な高潮の予測および再現計算ができるといえる。

5. おわりに

本研究では瀬戸内海を対象に、SuWATモデルとメソ気象モデルWRFを用いて、T0416とT0418来襲時の高潮再現計算を行った。潮位変動条件とWRFを用いた解析結果は、台風モデルを用いた結果よりも、潮位が精度良く再現されることがわかった。潮位変動を考慮せずに平均潮位で求めた高潮偏差と天文潮位を足し合わせる計算

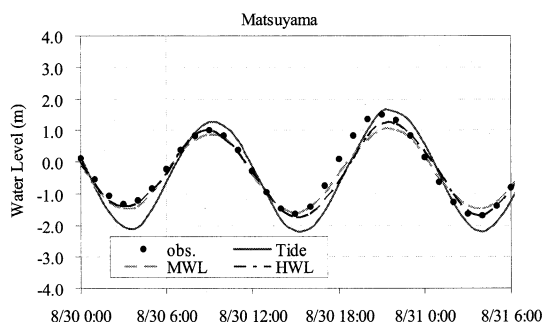


図-6(a) WRFを用いた場合の潮位 (T0416, 松山)

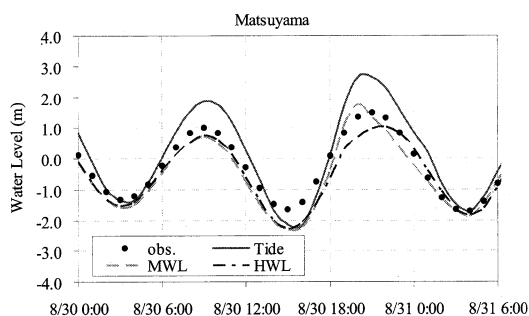


図-7(a) 台風モデルを用いた場合の潮位 (T0416, 松山)

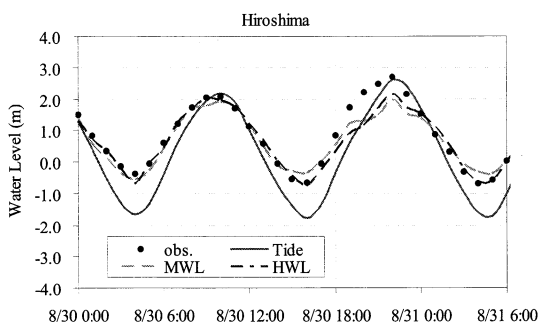


図-6(b) WRFを用いた場合の潮位 (T0416, 広島)

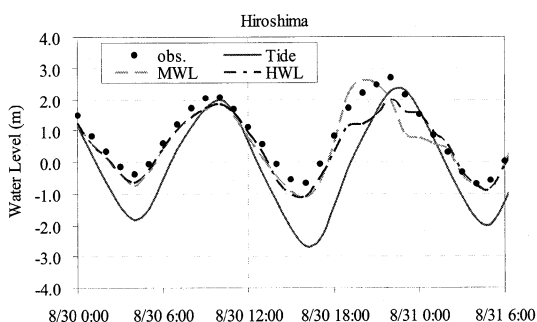


図-7(b) 台風モデルを用いた場合の潮位 (T0416, 広島)

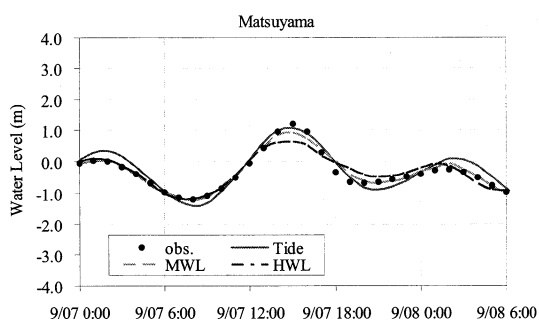


図-6(c) WRFを用いた場合の潮位 (T0418, 松山)

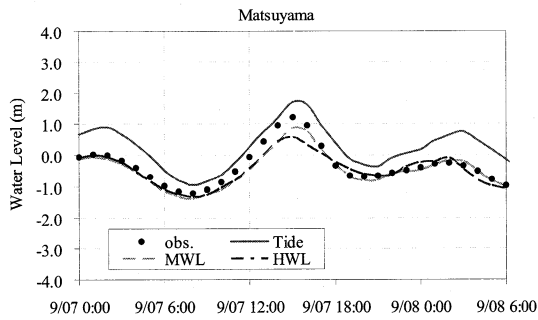


図-7(c) 台風モデルを用いた場合の潮位 (T0418, 松山)

条件は、WRFより台風モデルとの相性が良いことがわかった。

今後、より精度の高い解析結果を得るためには、瀬戸内海沿岸の小さな島々や四国山脈などの複雑な地形を再現できるように、WRFでネスティングを行うなどして、より詳細な気象場の解析が必要である。

参考文献

- 河合弘泰・川口浩二・大釜達夫・友田伸明・萩元幸将・中野俊夫(2007): 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, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.286-290.
- 金 洙列・高山知司・安田誠宏・間瀬 肇(2007): 高潮と波浪に及ぼす大潮汐変動の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.276-280.

- 藤井 健・光田 寧(1986): 台風の確率モデルの作成とそれによる強風シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, No.29, B-1, pp.229-239.
- 本田忠夫・光易 恒(1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.90-93.
- 吉野 純・村上智一・林 雅典・安田考志(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.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe(2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydro-dynamical Model: A Global Model and A Regional Model around Japan, Jour. of Oceanography, Vol.56, pp.567-581.
- WRF: A mesoscale numerical weather prediction model, NCAR (the National Center for Atmospheric Research), <http://wrf-model.org/>