

日本海沿岸における台風通過後の異常高潮特性の解析

Analysis of Abnormal Storm Surges After Passage of Typhoons Around West Coast of the Sea of Japan

金 洙列¹・松見吉晴²・安田誠宏³・間瀬 肇⁴・河合直樹⁵

Soo Youl KIM, Yoshiharu MATSUMI, Tomohiro YASUDA, Hajime MASE and Naoki KAWAI

At Sakai-Minato port around west coast of the Sea of Japan, abnormal storm surges have been measured with timing lags of 15 hours after landfall of typhoons. The present study examines the abnormal storm surges due to Typhoon 0314 and 0418 using the SuWAT (Surge-Wave-Tide coupled model) in different meteorological conditions by the WRF (Weather Research and Forecasting model) and an empirical typhoon model proposed by Fujii and Mitsuta. The results of simulations indicate that the abnormal surges forced by the WRF outputs show good agreement with the measurements. Also, this study describes mechanism why the abnormal surges with time lag are generated due to typhoons at the Sakai-Minato Port.

1. はじめに

高潮現象（最大水位，流速，最大波浪の発生時間等）を理解することは，沿岸地域における浸水や氾濫被害に対する避難対策を講じる上で重要なことである．太平洋沿岸での高潮は，一般的に台風通過時に最大潮位偏差が発生する．しかし日本海沿岸では，例えば境港の場合，図-1 (a) に示すように台風通過後，北緯約40° に到達した時に最大潮位偏差が発生する．この異常高潮発生の特性を示す事例として，図-1 (b) および (c) に示すように，台風0418号が通過した15時間後に，境港で最大潮位偏差が観測された．このような現象から日本海沿岸での高潮発生特性として，1) 台風の位置が遠く離れている，2) 台風が地形の影響を受ける，の2点が挙げられる．

従来の多くの高潮特性の研究は，台風の上陸以前および最接近時に限られており，台風通過後および遠く離れた場合の研究はほとんどない．日本海における高潮に関する最近の研究は，山下ら（2008）による研究があるが，図-1に示したような異常高潮を検討した研究はない．

気象場に及ぼす地形の影響を検討した研究は，最近では，河合ら（2007）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．また，次世代メソ気象モデルであるWRF（Weather Research and Forecasting model）を用いて，安田ら（2008，2009）はその利点を生かして瀬戸内海沿岸での高潮を計算している．

本研究の目的は，境港を対象とし，次世代メソ気象モデルであるWRFと，経験的な台風モデルを用いて，地形や台風周辺の気象場を考慮する場合としない場合の異なる外力条件により，高潮と波浪の推算結果に及ぼす影響を解析し，また，日本海沿岸での異常高潮の発生メカニズムを明らかにすることである．

2. 解析に用いる潮汐・高潮・波浪結合モデル

本研究では，Kimら（2008）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．高潮計算モジュールでは，非線形長波モデルを基礎式として用いている．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．本研究では，潮汐による水位変動や流れの計算は無視した．

3. 気象場の計算

(1) メソ気象モデル

気象場の計算に，メソ気象モデルWRFを用いた．WRFの入力データには，空間的に1度毎，時間的に6時間毎のNCEPの客観解析データ（FNL）を用い，WRFにより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，外力場とした．

WRFによるダウンスケーリングにあたっては，2つのケースを検討した．1つ目は，6段階の計算領域中図-1 (b) に示す第1領域から第3領域までtwo-way ネスティングし，第1領域のみナッジングを行う（この条件をWRF-NFとする）．この条件を用いると，6時間毎に計算領域でFNL再解析データに対する同化がなされるため，より観測値に

-
- | | | | |
|--------|------|-----------|---------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 鳥取大学大学院助教 | 工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 2 正会員 | 工博 | 鳥取大学大学院教授 | 工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 3 正会員 | 博(工) | 京都大学助教 | 防災研究所 |
| 4 正会員 | 工博 | 京都大学教授 | 防災研究所 |
| 5 学生会員 | | 鳥取大学大学院 | 工学研究科社会基盤工学専攻 |

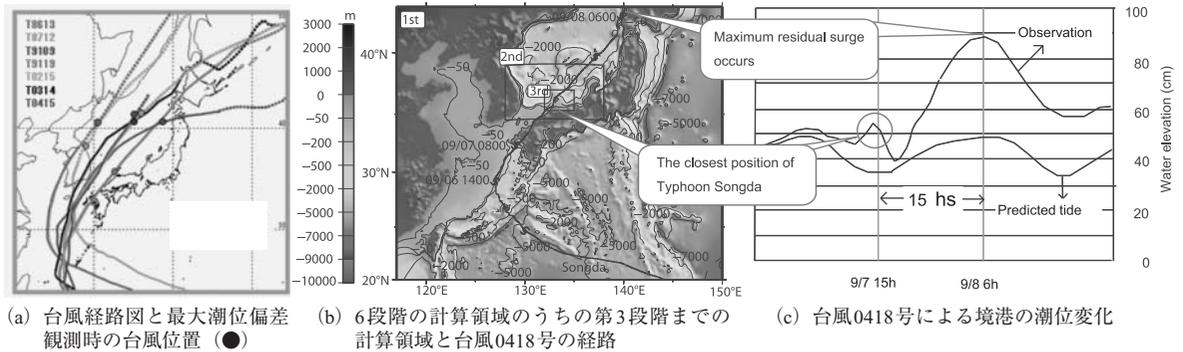


図-1 境港における異常高潮の概要

近い値が算出されることが期待される。2つ目の全領域に対してナッジングを行う条件 (WRF-NAと称す) では、WRF-NFで行った処理に加えて、第2・第3領域でも4次元同化処理を行う。領域間は同様にネスティングをする。

WRF計算での格子間隔は、後述する高潮の計算格子に合わせるため、第1領域では12150m、第2領域では4050m、第3領域では1350mに設定した。

(2) 台風モデル

気象モデルの他に、経験的台風モデルによる気象場の計算を行った。こうした台風モデルは簡便に取り扱うことができるため、多くの高潮研究に用いられてきたが、地形を考慮していないので、その出力値には非現実的な状況が含まれることもある。

本研究では、経験的台風モデルとして、風場には藤井・光田モデル (FMと略す) を用い、気圧場はMyersの式を用いた。台風期間中に全国148箇所を観測された海面気圧から最大風速半径を決定して、パラメータに用いた。

4. 境港への適用

(1) 解析条件

日本海沿岸に位置する境港を対象に、2004年の台風18号 (台風0418号) および2003年の台風14号 (台風0314号) が来襲した際の高潮再現計算を行った。

太平洋および日本海から境港までを解析対象とし、格子間隔比3:1で6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。6段階の計算領域を図-1 (b) と図-2に示す。実際の高潮計算を行う前に、気象場の初期値を初期条件として、spin-up計算を約240時間行った。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、あるいは、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、高潮の計算を行った。全計算領域の格子サイズと水深によるクーラン条件を満足するために、高潮計算のタイムステップは1sに設定した。波浪計算の Δt は900sに設定し、モデル間の情報交換は900s間隔とした。

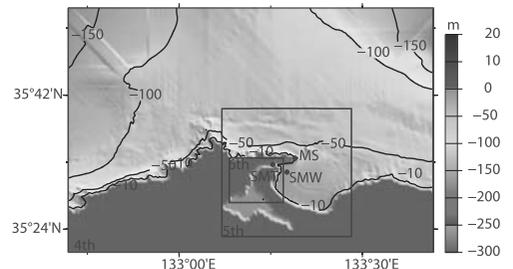


図-2 4番目から6番目までの計算領域と水位および波浪の観測点 (SM: 水位, SMW: 波浪)

表-1 数値計算の条件

実験ケース	気象場の条件	Wind stress parameter
WRF-NA-WDC	WRF	Wave dependent drag coefficient
WRF-NA-HD	Nudging All	Honda and Mitsuyasu formulae
WRF-NF-WDC	WRF	Wave dependent drag coefficient
WRF-NF-HD	Nudging 1st	Honda and Mitsuyasu formulae
FM-WDC	FM (SGW)	Wave dependent drag coefficient
FM-HD		Honda and Mitsuyasu formulae

また、表-1に示したように、海面抵抗摩擦係数の取り扱いについて、波の影響を考慮したJanssenの手法と経験式である本多・光易式の2種類を、それぞれ気象場WRF-NF、WRF-NAおよびFMに対して用いることにした。条件名は、例えば全領域でナッジングをし、摩擦係数には Janssen モデルを用いる場合を WRF-NA-WDC と示した。

(2) 気圧の解析結果

WRFとFMから予測した気象場と日本海沿岸で台風0418号の来襲時、気圧と風が観測された19箇所の観測値との比較を行った。図-3にその観測点とその番号を示す。気圧の場合、9箇所を観測され、観測値から海面気圧に変換したものとWRF-NF、WRF-NAおよびFMの解析結果との相関係数を求め、図-4に示した。また、観測値とWRFおよびFMによる解析結果の時系列比較の一例として、三度崎と弾崎での結果を図-5に示す。

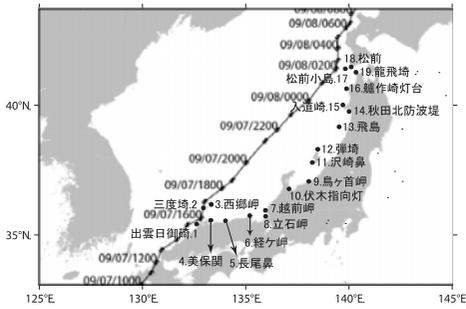


図-3 比較に用いた気象観測点

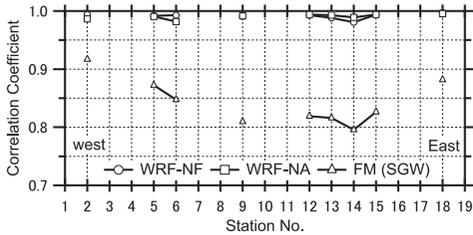
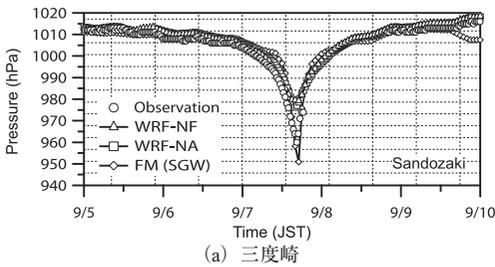
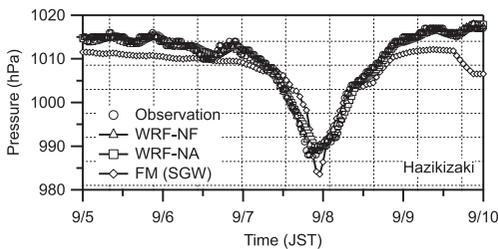


図-4 海面気圧の解析値と観測値の相関係数



(a) 三度崎



(b) 弾崎

図-5 海面気圧の解析値と観測値の比較

WRFを用いた場合、相関係数が平均0.99と高い相関関係が得られた。WRF-NFを用いた場合もWRF-NAの場合も、同じような結果が得られた。しかし、FMを用いた場合、0.92から0.80まで相関係数の変化幅が広く、平均0.84であった。特に、日本海西側より東側の相関性が良くなかった。

日本海西側の三度崎における時系列の比較では、最大気圧低下はFMを用いた場合の結果が観測値に近い。WRFを用いた結果は、最大気圧低下量に少し差がみられるが、時間変化は観測結果と良く一致している。日本海東側の

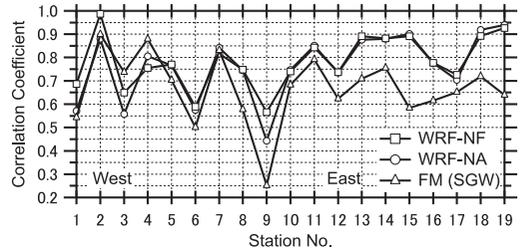
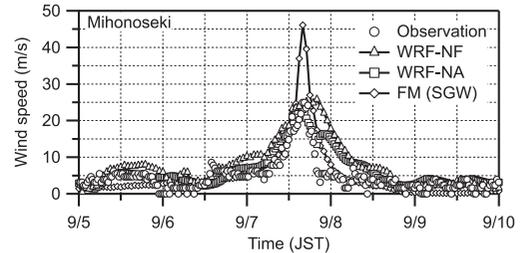
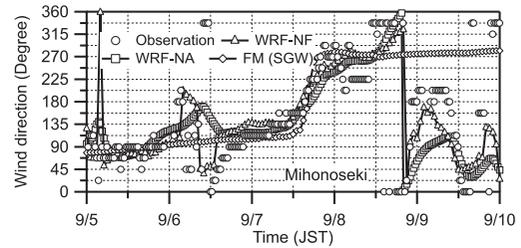


図-6 海面上10m風速の解析値と観測値の相関係数



(a) 海面上10m風速



(b) 風向

図-7 美保関における風速・風向の解析値と観測値の比較

弾崎における時系列をみると、WRFを用いた場合の最大気圧低下量、変化傾向のいずれも、観測結果と良く一致している。

(3) 風速・風向の解析結果

気圧の場合と同じように19箇所の観測値から海面上10m風速に変換したものとWRF-NF、WRF-NAおよびFMの解析結果との相関係数を図-6に示す。さらに、境港周辺的美保関で観測された、風速や風向を図-7に示す。

WRF-NF、WRF-NAおよびFMの平均相関係数はそれぞれ0.76、0.78および0.67であった。地点番号7である越前岬までは、3種類の相関係数はおおよそ同じであるが、地点番号8以降のFMの相関係数は、WRFのそれと比べて小さくなっている。この結果から、WRFによる解析風速はより観測値に近いことがわかる。

また、図-7 (a) に示したように台風接近前後の時系列の変化は、WRF-NFやWRF-NAを用いた結果が観測結果と良く一致している。最大風速では、FMによる結果は観測値の1.5倍を上回っている。WRFによる最大風速は、FMの結果に比べ、観測結果をより良く再現できている。19箇所のすべての観測地点において、以上のような傾向が

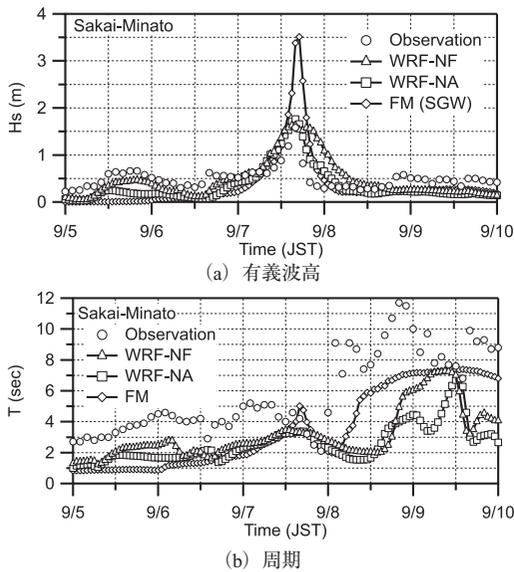


図-8 境港における波浪の推算値と観測値の比較

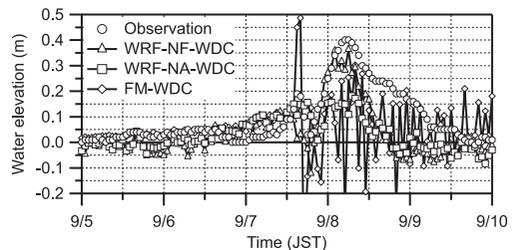
みられた。

図-7 (b) は風向変化を示したものである。観測風向は台風の接近時以外にも激しく変化している。このような急変化は、WRF-NFおよびWRF-NAの解析結果にも再現できている。しかし、FMの結果は、台風の接近時を除いて、東風や西風の一定な風向となっている。こうした傾向は、19箇所の観測地点においても同様であった。

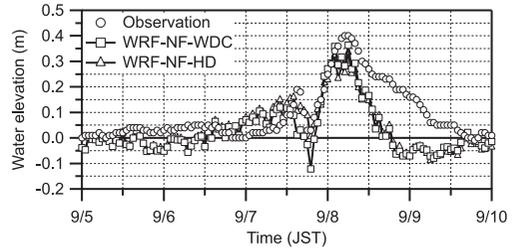
(4) 台風0418号による高潮と波の推算結果

図-8は、波浪推算結果である有義波高と周期を示したものである。WRF-NFおよびWRF-NAの気象外力を用いた波浪推算結果は、観測値の時系列変化と良く一致している。最大有義波高も良く再現されている。最大波高出現後の波高減少時には、WRF-NAを用いた結果がWRF-NFを用いた結果より観測値に近い。周期に関しては、計算結果は1次モーメントから求めた周期であるため、観測の有義波周期と比べて小さくなるのは当然としても、観測周期に比べて短く算定された。周期の変化傾向、すなわち、台風の接近前は短く、通過後に長くなった傾向は推算結果でも現れている。

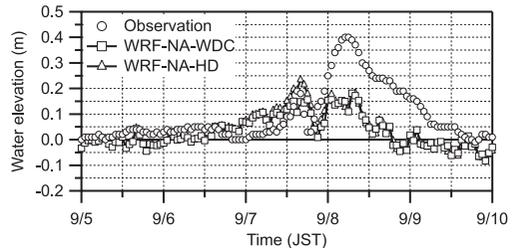
図-9 (a) ~ (c) は、異なる条件での高潮偏差の推算結果を示したものである。(a) 図は wave dependent drag coefficientを用いたWRF-NF、WRF-NAおよびFMによる推算結果である。FMの気象場を用いたFM-WDCは、台風接近前までは水位のスムーズな変動が得られたが、ピークに大きな値となった後に発散した。WRF-NF-WDCの場合、台風接近時の9月7日17時頃水位が上昇し、台風通過とともに下降して、8日3時頃に再び最大高潮偏差が発生するのがうまく再現できた。しかし、最大高潮偏差出現後の水位低下が、観測値より急激になっている。WDC-



(a) 3種類の気象場を用いた高潮偏差結果の比較



(b) WRF-NF条件下の異なる wind stress parameter を用いた場合



(c) WRF-NAの条件下の異なる wind stress parameter を用いた場合

図-9 境港における高潮推算結果と観測値の比較

NA-WDCの場合は、台風通過直後の水位変動は再現できたが、最大高潮偏差の推算結果が、観測値やWDC-NF-WDCの結果より小さくなっている。

WRF-NFおよびWRF-NAによる気象場を適用して、異なる風速抵抗係数を用いた場合の高潮推算結果と観測値との比較図を図-9 (b) および (c) に示す。これらの図から同じ気象場条件を適用した場合、異なる風速抵抗係数を用いても推算結果はほぼ同じであることがわかった。

図-10 (a) ~ (d) にWRF-NA-WDCによる推算結果の水位と風速ベクトルの平面分布を示す。(a) 図に示した台風通過直後の9月7日17時頃、境港周辺の陸上風による水位低下とともに、島根県沿岸での西風および西北風の海上風による水位上昇がみられる。(b) 図より22時になると、島根県沿岸で上昇した水位が、西風により鳥取県沿岸に伝わっていく。同時に能登半島周辺海域にも水位上昇が発生する。(c) 図の8日2時頃には、上昇した水位が境港を通過していく。その後、(d) 図のように高潮は境港を過ぎて東側に伝わり、弱くなった風の影響で消滅する。

(5) 台風0314号による高潮と波の推算結果

台風0314号による気象場についても、日本海沿岸の19

箇所の観測値と比較したが、台風0418号の場合と同様結果であったので、高潮推算結果のみを載せる。

図-11は、WRF-NF-WDC, WRF-NA-WDCおよびFM-WDCによる推算結果と観測値を示したものである。WRF-NFの気象場を用いると、台風0418号の際と同様に、WRF-NAやFMによる気象場より、観測値に近い結果が得られた。なお、FM-WDCを用いると、高潮推算結果が発散した。

WRF-NFによる気象場を用いることで、2003年9月13日6時頃、境港における台風の最接近による最大風速発生と、通過後の19時頃に発生した最大高潮の再現計算ができた。

5. おわりに

本研究では、日本海西沿岸の境港を対象に、SuWATモデルおよびメソ気象モデルWRFと台風モデルFMを用いて、台風0314号および台風0418号通過後に発生する高潮再現計算を行った。本研究で明らかになった主要な結果は、以下のとおりである。

- 1) 地形の影響を考慮できる気象モデル (WRF) を用いた場合、台風モデル (FM) を用いた場合よりも気象場の観測値に近い値が得られる。
- 2) WRFによる気象場を外力として用いると、FMによる気象場より、より良い波浪・高潮推算結果が得られる。また、WRFの計算にあたり、第1領域に4次元データ同化(ナッジング)を行い、かつネスティングする条件が、最も良い高潮推算結果が得られる。
- 3) 境港における高潮の発生には、台風通過後の西風または西北風により、島根県沿岸に発生した水位上昇が東側に伝わり、台風通過の十数時間後に最大高潮が発生するというメカニズムがある。

本研究は、科学研究費補助金若手(スタートアップ)(20860056)による成果の一部であることをここに記す。

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.

安田誠宏・山口達也・金 洙列・島田広昭・石垣泰輔・間瀬肇(2008): 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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.331-335.

安田誠宏・山口達也・金 洙列・森 信人・間瀬肇(2009): 気象モデルにおける4次元データ同化およびネスティングが高潮推算精度に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第56巻 (印刷中).

山下隆男・金 庚玉・李 漢洙・駒口友章(2008): 大気・海洋結合モデルによる日本海の高潮・高波の数値解析 - 2008年2月の爆弾低気圧への適用 -, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.166-170.

Kim, S. Y., Yasuda, T. and Mase, H. (2008): Numerical Analysis of Effects of Tidal Variations on Storm Surges and Waves,

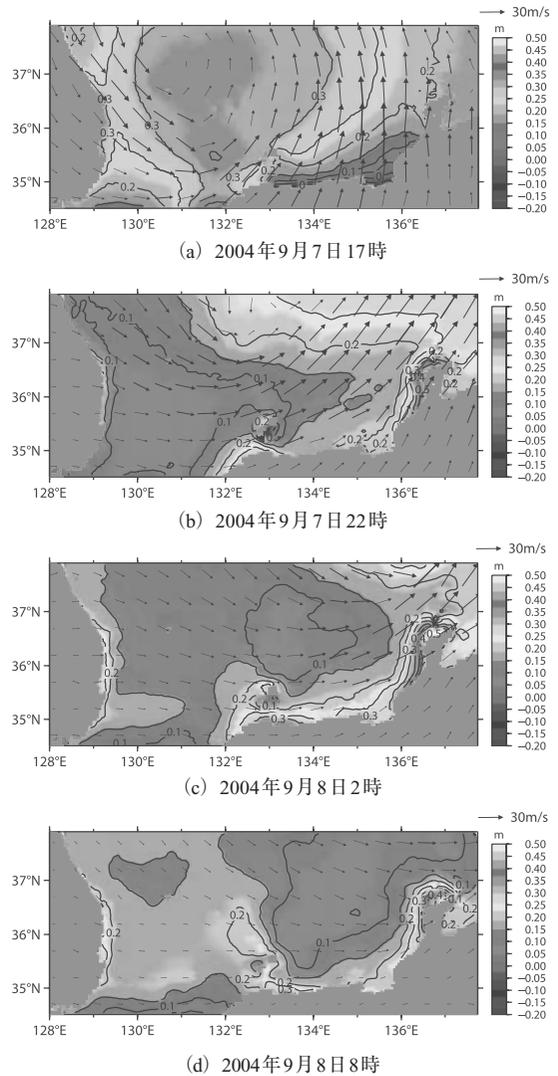


図-10 台風0418号による風速ベクトルと水位の等値線

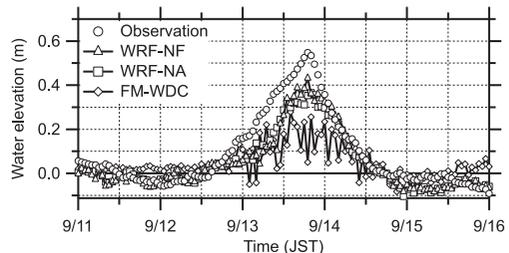


図-11 台風0314号来襲時の境港における高潮推算結果と観測値の比較

Applied Ocean Research, Vol.30, pp.311-322.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G. (2008): A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, 113p.