

高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響

吉野 純¹・村上智一²・林 雅典³・安田孝志⁴

本研究では、台風 0416 号によって瀬戸内海に発生した広域高潮の再現実験を行い、高潮計算精度に及ぼす入力気象場の再現性の影響について検討した。パラメトリックな 2 次元台風モデルを入力値として海洋モデルを駆動させる従来型の手法と比較して、近年急速に発展しているメソ気象モデルを入力値とする手法は、極めて高い精度で潮位変動を予測できることが明らかとなった。日本に接近・上陸する台風の多くは、中心から遠く離れた場所であっても発達したアウトーレインバンド（外縁部降雨帯）を伴うことがあり、中心付近の壁雲に匹敵するほどの強風ピークを形成することがある。このような複雑な台風気象場を再現できるメソ気象モデルの適用は、高精度な高潮予測を行う上で不可欠となる。

1. はじめに

2004 年 8 月下旬に日本列島を縦断した台風 0416 号によって、高松（高知県）や釧路（北海道）など全国 9 地点で観測史上最高の潮位を記録した。特に、瀬戸内海沿岸の広い地域で高潮が発生し、最も大きな被害を受けた高松では、予測を大きく超える 246 cm の最大潮位が観測された。

この高潮は、夏の大潮・満潮と台風接近が重なって生じたものであると定性的には解釈できるが、潮位偏差そのものを定量的に予測するのは容易なことでない。瀬戸内海は、外洋と繋がる開口部が 3 カ所（紀伊水道、豊後水道、関門海峡）もあり、東西に 400 km 以上のスケールを持つ半閉鎖性水域であることから、高潮時の海水流入プロセスはその他の湾と比較して遙かに複雑であり、数値的に高潮推算を行う際には、高潮モデルの計算設定や駆動力となる入力気象場などに細心の注意を払う必要がある。

これまでの高潮推算では、入力気象場として、Fujita の式や Myers の式に代表される経験的な気圧分布式に傾度風平衡方程式を組み合わせた、パラメトリックな「2 次元台風モデル（以下、2D 台風モデル）」が広く使用されてきた。2D 台風モデルは、計算コストが極めて低く、且つ、計算に要する入力条件は気象庁ベストトラックの記載情報だけで充足するため、速報性を重視する高潮予報には効果的な手法である。しかし一方で、その方程式系の過剰な簡略化表現により、（1）沿岸地域の地面起伏・粗度変化の効果、（2）レインバンドに伴う局所的な強風構造の効果、（3）台風中心から縁辺部、環境場に至る広域気象場の再現、（4）台風のライフサイクル

（発生期、最盛期、減衰期、温低化期）に応じた内部構造の変化、などと言った計算精度に大きな影響を与えるであろう重要な物理プロセスが無視されている。そのため、現状の 2D 台風モデルでは、高潮モデルへの入力気象場としては無視できない誤差を含んでいる可能性があり、高潮推算誤差の主因になっているものと推測される。

本研究は、この従来の「2D 台風モデル」に代わって、近年、急速に発展している「メソ気象モデル」を適用することが、これらの問題を解決する上で最も効果的であることを主張するものである。過去の研究報告（村上ら、2004；吉野ら、2005；村上ら、2006）によると、メソ気象モデルと海洋モデルとの双方向結合計算により、気象場（台風場）と海洋場を一体的に考慮した計算が可能となり、精度面での有用性が実証されている。よって、高潮推算においても、2D 台風モデルに比べ、より近似が少なく、より忠実に大気の 3 次元構造を再現できるメソ気象モデルの適用が、推算精度向上への近道になると期待される。そこで、この台風 0416 号を事例として、高潮モデルへの入力気象場として、2D 台風モデルを用いた場合と、メソ気象モデルを用いた場合とで、高潮推算に如何なる違いが生じるかについて比較・検証を行う。そして、現状の 2D 台風モデルでは考慮されておらず、精度向上のために考慮すべき不可欠な物理プロセスとは一体何か？それを解き明かすことを本研究の目的とする。

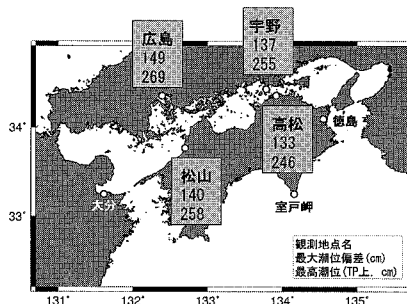


図-1 各地の観測潮位（数値は気象庁より）

- 1 正 会 員 博(理) 岐阜大学助手大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
2 正 会 員 博(工) 名古屋大学助手大学院工学研究科社会基盤工学専攻
3 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
4 フェロー 工博 岐阜大学教授大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

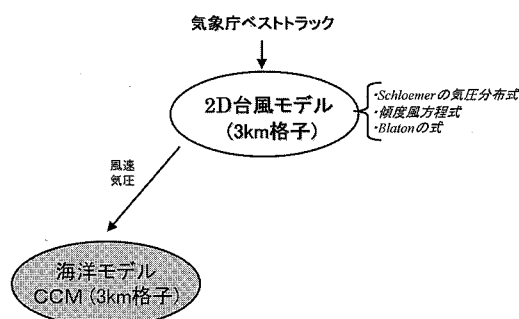


図-2 CASE1 の結合計算の概念図。

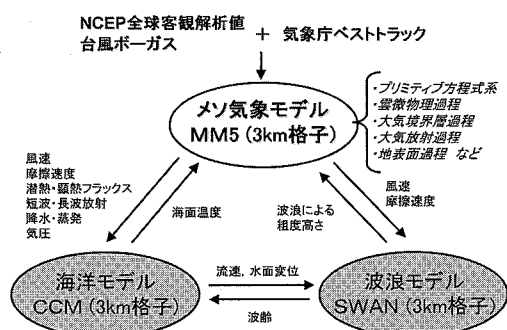


図-3 CASE2 の結合計算の概念図。

2. 高潮の状況

本研究の対象事例である台風 0416 号によって、2004 年 8 月 29 日から 31 日かけて、全国的に最大潮位偏差 50 cm 以上を観測し、特に瀬戸内海沿岸を中心として 1 m を越す高潮が観測された。一年を通して最も潮位の高い時期に当たり、30 日夜に台風接近と満潮とが重なって、岡山県宇野港で最大潮位 255 cm、香川県高松港で同 246 cm を観測するなど(図-1)、各地で最高潮位の極値を更新した。高松では床上浸水 6,093 棟、床下浸水 9,468 棟となり、最も大きな被害となった(気象庁、2004)。その他、台風 0416 号に関連する情報については、気象庁(2004)や吉野ら(2005)の報告を参照されたい。

3. 数値実験の概要

本研究では、従来型の高潮推算手法である「2D 台風モデル」を高潮モデルに結合する手法(以降、CASE1)と、新しい推算手法である「メソ気象モデル」を結合する手法(以降、CASE2)の2種類の高潮再現実験を行った。それぞれのモデルの概要と結合計算の設定について、以下に解説する。

尚、高潮推算の計算領域は、大きな被害を受けた瀬戸内海全域をカバーする図-1の範囲とし、台風 0416 号の接近・上陸・通過を捉えるため、2004 年 8 月 28 日 00 時から同 31 日 00 時(世界標準時、以降同じ)までの計 3 日間計算を行った(30 日 14 時頃に瀬戸内海全域で高潮発生)。

(1) 高潮推算のための海洋モデル CCM

両 CASE いずれの高潮計算においても、村上ら(2004)により開発された海洋モデル CCM (Coastal ocean Current Model) を高潮モデルとして使用した。この基礎方程式系は、運動方程式、連続方程式、温度・塩分に関する移流拡散方程式、状態方程式、及び、Mellor-Yamada Level 2.5 乱流モデルによって構成される。初期・境界条件には、JCOPE 領域海洋客観解析値(10 km 格子間隔; 2 日間間隔)・全球海洋潮汐モデル NAO

解析値を適用した。多重座標系の採用により深海域から浅海域まで連続的に計算可能であり、本事例のような外洋から内海への海水流入を精度良く再現する上で、最適の高潮モデルであると言える。ここで、CCM の空間解像度は 3 km とした。

(2) 2D 台風モデルとの結合計算 (CASE1)

CASE1 の入力気象場として使用した 2D 台風モデルは、光田・藤井(1997)の研究に基づいており、気圧分布式としては Schloemer の式を、風速場には傾度風方程式を、台風移動効果には Blaton の式を採用している。気象庁ベストトラックを入力条件(中心位置、移動速度、中心気圧など)として設定することで、台風内部の 2 次元的气圧場・風速場を簡易的に推算できる。2D 台風モデルの空間解像度は、海洋モデル CCM のそれと合わせて 3 km とした。

図-2 は、2D 台風モデルと海洋モデル CCM との結合計算の概念図である。10 分毎に 2D 台風モデルによる推算値(風速、気圧)が CCM に入力され、その間の入力気象場は定常を仮定する。

(3) メソ気象モデル MM5 との結合計算 (CASE2)

CASE2 の入力気象場として使用したメソ気象モデルは、ペンシルバニア州立大学と米国大気科学研究センターにより開発されたメソスケール(1-1,000 km)の気象現象を対象とした非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系プリミティブ方程式系モデル MM5 (fifth generation mesoscale model) である(Dudhia, 1993)。雲微物理過程(Reisner graupel scheme)、大気放射過程(Cloud radiation scheme)、大気境界層過程(Mellor-Yamada Eta scheme)、地表面過程(5-layer soil scheme)など、台風内部の 3 次元構造を表現する上で不可欠となるあらゆる物理プロセスが考慮されている。また、台風進路と台風強度を共に精度良く再現できるよう、4 次元データ同化(ナッジング法)と台風ボーガス(気象庁ベストトラックを入力条件)を併用して計算を行った(大澤, 2005)。ナッジング係数は、 2.5×10^{-5} とした。初期・境

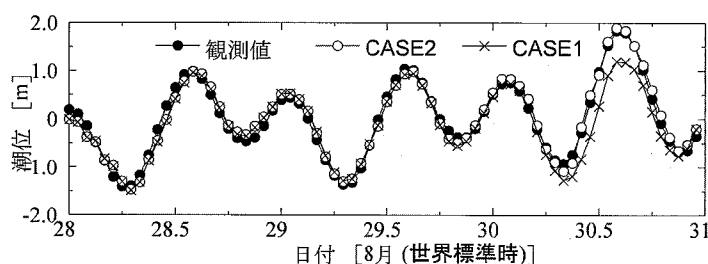


図-4 高松における潮位の観測値と計算値の時系列.

界・同化条件には, NCEP 全球大気客観解析値 Final Analyses (1° 格子間隔; 6 時間間隔) を使用した. MM5 では, 9 km と 3 km の単方向ネスティングによる計算を行い, 3 km 格子領域のみを高潮計算の入力値として適用した. 9 km 格子領域は, 台風の移動や内部構造を周囲の環境場も含めて精度良く再現するためのものであり, 3 km 格子領域の側面境界条件として適用した.

図-3 は, メソ気象モデル MM5 と海洋モデル CCM との結合計算の概念図である. 同じく 10 分毎に MM5 と CCM の間で海面境界過程に関連する情報交換が行われる. CASE1 (図-2) に比べてより多くの情報交換が行われ, 風速場や気圧場のみならず, 降水過程, 熱力学過程, 放射過程の効果も高潮計算に反映される. また, 結合計算サイクルの中に, 第 3 世代波浪推算モデル SWAN (3 km 格子間隔) も, その一部として組み込まれている. この計算手法に関する詳細については, 吉野

ら (2005) や村上ら (2006) を参照されたい.

4. 結果と考察

本章では, 従来手法 (CASE1) と新手法 (CASE2) の計算結果を比較し, 考察を進めてゆく.

(1) 高潮推算の精度検証

はじめに, 両 CASE による潮位変動の計算結果について比較・考察する.

図-4 は, 高松における潮位の観測値と計算値の時系列を示す. 高松では, 30 日 14 時に 124 cm の潮位偏差ピークを観測した. 従来手法の CASE1 の結果を見ると, ピーク時の潮位偏差は, 64 cm の過小評価であり, 実際の潮位偏差の半分程度しか再現できていないことが分かる. 一方, 新手法である CASE2 の場合, 高潮発生期間にわたって量的に殆ど一致した時間発展を示しており (ピーク時に 6 cm の過大評価), 村上ら (2006) による

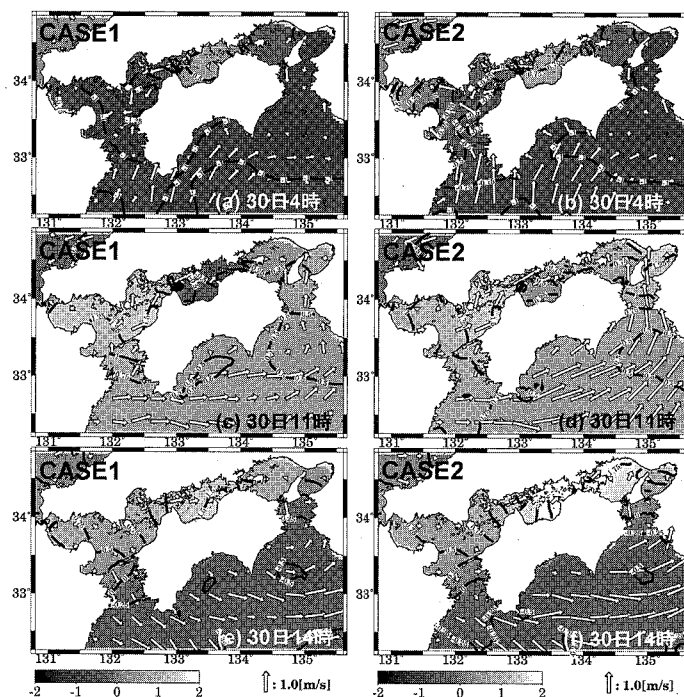


図-5 両 CASE における表層流速と潮位の分布. (上段) 30日 4時, (中段) 同11時, (下段) 同14時.

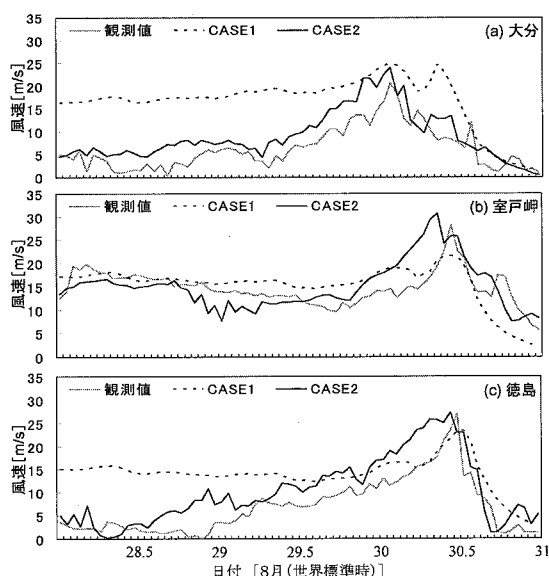


図-6 各地の風速(10m 高度)の観測値と計算値の時系列.

大気-海洋-波浪結合モデルの計算精度の高さを示している。この結果から、従来手法による高潮推算の誤差の主因は、本事例に関しては入力気象場にあると言え、単純な 2D 台風モデルに代わって、より高精度なメソ気象モデルを、高潮モデルの入力気象場として適用するべきであると言えるだろう。

次に、図-5 は、両 CASE による潮位及び表層流速の分布を示す。台風が豊後水道に最接近した時 (30 日 4 時)、両 CASE 共に、強い南風による吹き寄せ効果で、豊後水道に大量の海水流入が生じている。特に、CASE2 の方がより顕著であるように見受けられる。そして、台風が中国地方に進むと (同 11 時)、一転して豊後水道の海水流入は弱まり、特に CASE2 で紀伊水道の

海水流入が強まっている。CASE2 の紀伊水道での流速 (約 1 m/s) は、CASE1 の 2 倍以上にも達し、強い吹き寄せ効果の結果として潮位の南北勾配が大きくなっている。豊後水道と紀伊水道の 2 カ所の開口部からの大量の海水流入が重なる (流動の収束が生じる) ことで、同 14 時に、瀬戸内海の広い範囲で高潮が発生したと考察できる。CASE2 では、高松付近で潮位が 200 cm を超えており、CASE1 よりも 50 cm ほど高く、より現実的な潮位変動が再現できた。

このように、入力気象場の相異は、高潮推算結果に大きな相異を生みだし、特に本事例の場合は、台風中心から 200 km 以上も離れた紀伊水道での大量の海水流入を再現できるか否かが、高潮計算精度に大きな影響を与えたと考えられる。そして、極めて高い精度で、この表層流動と潮位変動を再現できる新手法 (CASE2) の有用性が実証された。

(2) 入力気象場の比較

次に、前節のように両 CASE 間で高潮推算に大きな相異が生じた原因を明らかにするために、入力気象場に着眼した比較・考察を行う。

図-6 は、瀬戸内海沿岸の各地 (観測点の位置については、図-1 を参照) の地上 10m 高の風速の観測値と計算値の時系列を示す。豊後水道に近い大分 (図-6(a)) では、CASE2 の計算値は観測値とよく一致した変化を示している。一方で、CASE1 では、台風最接近時の風速は比較的一致しているものの、台風が接近する 2 日前から 10 m/s 近い過大評価となっており、台風遠方での風の推算精度が悪いことが見て取れる。この傾向は、徳島においても同様に確認できる。メソ気象モデルは、台風を中心から縁辺部、そして周囲の高低気圧擾乱など環境場まで考慮した計算が可能のため、台風接近前の中心

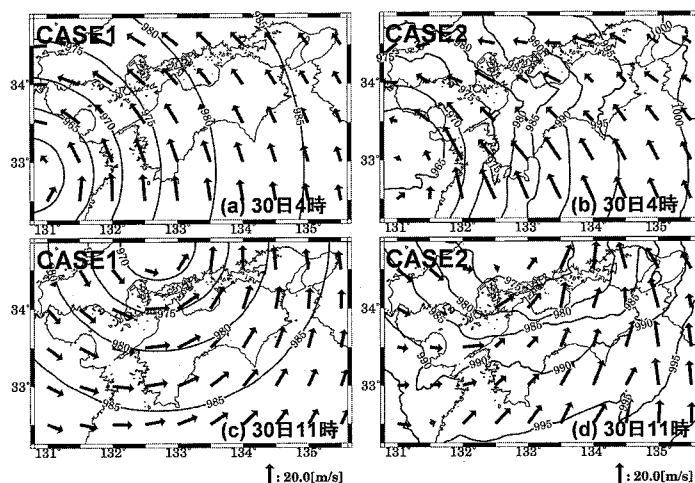


図-7 両 CASE における風ベクトル (10m 高度) と海面更正気圧の分布。(上段) 30 日 4 時、(下段) 同 11 時。

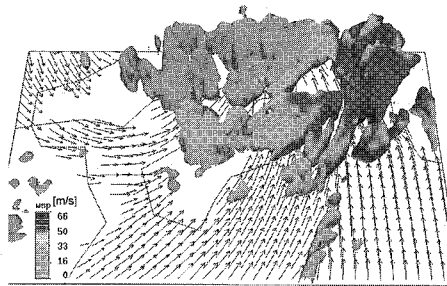


図-8 メソ気象モデルにより再現された雲の3次元分布と海上風ベクトル。雲域における色の濃淡は風速を示す。

から遠く離れた場所であっても、風の推算精度が高いと考えられる。また、沿岸地域における複雑な地形や土地利用変化をメソ気象モデルでは適切に表現できている点も入力気象場の高精度化に貢献している。

一方で、室戸岬(図-6(b))や徳島(図-6(c))では、異なる傾向も確認できる。これらの地点は、台風の直撃を受けた大分に比べて、台風中心から遠く離れた場所に位置していたにも関わらず、ピーク時(30日11時頃)には、約25 m/sとなり強い南風が卓越していた。CASE2では、その強風ピークを高い精度で再現できているが、CASE1では、5 m/s程度の過小評価となっている。前述したCASE1の紀伊水道における表層流速の過小評価(図-5(c))は、この台風縁辺部の強風構造を2D台風モデルでは表現できなかったことに起因すると言えよう。

ここで、より詳しく再現された風速場について比較する。図-7は、両CASEによる風ベクトル(10 m高度)及び気圧分布を示す。共に、一見、類似した分布パターンを呈しているが、細部を見ると大きく異なっている。台風が九州を通過の際(30日4時)には、CASE2では沿岸の地形の影響を受けて、豊後水道で風の通り道となり、20 m/s以上の強風が卓越し、結果として、豊後水道における大量の海水流入へと作用した。この強風は、台風の壁雲付近のピークによるものであり、CASE1でも、若干過小評価ではあるが、ある程度再現できている。その後、台風が中国地方に北東進すると(同11時)、CASE2では台風中心から遠く離れた紀伊水道でも、強い南風が卓越するようになる。これは、前述の壁雲付近の強風ピークとは異なる別起源のものであり、CASE1の2D台風モデルでは再現できなかった(CASE2よりも約5 m/sの過小評価)。

この縁辺部における強風ピークは、台風の外縁部にて発達することのある「アウターレインバンド(外縁部降雨帯)」の通過によるものであり(図-8)、3次元的に雲微物理過程を考慮したメソ気象モデルでなくては決して

再現できないものである。このようなアウターレインバンドの通過と副次的な強風ピークとの関係性については、これまでも多くの観測事例が報告されているが、本事例の場合は、局所的な強風だけにとどまらず、広域高潮の要因にもなり得たという点において非常に重要な知見である。今後の更なる事例調査が望まれる。

以上により、台風による広域高潮の再現性を向上させるためには、台風近傍の気象場のみならず、中心から縁辺部、そして環境場まで含めた広域気象場の精度向上が必須であり、特に、雲微物理過程を考慮できるメソ気象モデルの適用が最も有効であると結論づけられた。

5. 結 語

本研究では、台風0416号によって瀬戸内海に発生した広域高潮の再現実験を行い、入力台風気象場が高潮計算精度に及ぼす影響について検討を行った。パラメトリックな2D台風モデルを入力値として海洋モデルを駆動させる従来型の手法と比較して、本研究で用いられたメソ気象モデルを入力値とする手法は、極めて高い精度で潮位変動を再現できることが明らかとなった。

また、中心から遠く離れた場所であっても、本事例のように発達したアウターレインバンド(外縁部降雨帯)によって局所的な強風ピークを形成することがあり、広域高潮を高精度に予測する上で、台風中心付近のみならず縁辺部を含めた広域気象場を精度良く再現できるメソ気象モデルの適用が不可欠であると結論づけられた。

本研究は、科学研究費補助金若手研究(B)17740306、及び、基盤研究(B)(2)16360243による成果である。

参 考 文 献

- 大澤輝夫(2005): MM5用台風ボーガス導入ツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証, 月刊海洋, 第42巻, pp. 178-185.
- 気象庁: 災害時自然現象報告書2004年第2号(オンライン), <http://www.kishou.go.jp/books/saigaiji/2004ty16.pdf>, 参照2004-09-24.
- 光田寧・藤井健(1997): 台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速との関係, 京都大学防災研究所年報, 第40号, pp. 165-172.
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫(2004): 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 366-370.
- 村上智一・川崎浩司・山口将人・水谷法美(2006): 気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 103-108.
- 吉野純・村上智一・林雅典・安田孝志(2005): 大気-海洋-波浪結合モデルを用いた台風0416号の強度予報実験, 月刊海洋, 第42巻, pp. 194-202.
- Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Mon. Wea. Rev., Vol. 121, pp. 1493-1513.