

台風の風域場と降雨場の数値シミュレーション

山下隆男*・西口英利**・金 庚 玉***・玉田 崇****

台風は、環境への大きなインパクト、災害の外力となる気象現象であり、これにより発生する局地的で強い風域場、降雨場の再現は海岸工学上、極めて重要な外力シミュレーションである。本研究では、簡易台風モデル（光田・藤井モデル）と MASCON モデル、さらにメソ気象モデル（MM5）による風域場の比較を行う。次いで、洪水や集中豪雨による河川・海岸系での土砂輸送問題に必要な、豪雨のシミュレーションが、MM5 でどの程度再現できるかを検討する。台風に伴う強風場の再現性の評価は、台風 9918 号による周防灘での高潮シミュレーション結果により行った。一方、MM5 による豪雨解析では、台風 0215 号により発生した韓国東海岸で総雨量 900 mm 以上の降雨場の再現計算を行った。

1. 緒 言

台風や豪雨等のメソスケールの異常気象は、地球上での気流や流水による災害（流体災害）を引き起こす自然外力であり、流域・海域の環境に大きなインパクトを与える。生活圏に災害をもたらす気象現象の大半は、水平スケールで 2 km から 2000 km, 時間スケールで数十分から数時間ないし数日程度のメソスケールのものか、それ以下のミクロスケールの現象である。海岸工学の分野においても、このようなスケールの気象の解析に気象数値モデルを用いることが多くなってきた。

気象モデルの支配方程式系は、地球の回転を考慮した Navier-Stokes の運動方程式、熱力学方程式、圧縮系の連続方程式、水蒸気混合比式、雲・降水粒子混合比式、および雲・降水粒子の数密度式で構成される。気象モデルにおいて雲は大気の駆動力として重要である。豪雨をもたらす積乱雲とその組織化した雲の熱力学系は複雑なシステムで、流動場と雲物理の非線形相互作用で時間発展特性が支配される。このような力学システムを数値モデルによってシミュレーションするためには、最低限度、次のような雲物理過程を詳細に再現することが求められる。すなわち、水蒸気を含む空気塊が大気中を上昇するとき、水蒸気から雲・降水粒子への変換が起こり、雲が生成され降水が起こる。降水の形成過程は大きく「暖かい雨」と「冷たい雨（氷相雨）」に分けられる。暖かい雨は氷相過程を全く経ずに雲から降る雨で、雲の全ての領域が 0°C 以上にあるが、氷相雨は降水粒子の成長過程の主要な部分に氷相過程が関与するような雨で、この場合雲の一部または全部は 0°C 以下にあり、通常は液相と固相の水が両方存在する。

台風は、積乱雲とその組織化した雲集団が極度に発達した気象じょう乱で、地上、海上に強風を作用させるため、海岸では波浪、高潮、海岸侵食を発生させる主外力

である。台風の圧力場は同心円分布で比較的うまく再現でき、気圧勾配による傾度力、遠心力、コリオリ力とがバランスする運動方程式から、接線方向風速に関する 2 次方程式の解として、傾度風場が容易に計算できる。これと、台風が移動することで発生する移動風とを足し合わせて台風の風速分布が得られる。地上面近くでの風場を求めるためには、地上摩擦の影響（風速ベクトルの負方向で、強さは風速の 2 乗に比例する）を考慮する必要がある。この場合は、風速ベクトルは同心円の接線方向より中心を向く方向に修正される。このため、台風中心に向かって吹き込む風の角度を調整することで地上摩擦の影響を導入する。実際には、海上で 15°、陸上で 30° 程度の吹き込み角が目安となる。このような方法で台風の地上風場を再現する簡易な台風モデルが作られ、実用に供されてきた（例えば、藤田モデル；光田・藤井モデル；光田, 1997）。しかしながら、山地や内海が複雑に入り組むような地形条件の下では、地形により気流の方向や強さが変化する効果を考慮する必要がある。この影響は、MASCON (Mass Consistent Model) モデル（または MATHEW モデル）(Dickerson, 1978)を用いることにより、簡易な台風モデルの修正として、取り入れられる。すなわち、大気の質量の連続式を制約条件として、簡易な台風モデルで得られた風場を、地形の効果が入っている風場となるよう、変分法により修正する。

地形の影響だけではなく、台風の気象場そのものをより合理的に再現するため、MM5 等のメソ気象モデルによる計算も頻繁に行われるようになってきた。

本研究では、MASCON モデル併用型の簡易な台風モデル（光田・藤井モデル）とメソ気象モデル（MM5）による台風の風域場の再現性を検討する。次いで、MM5 により豪雨のシミュレーションが、どの程度まで再現できるのかを検討する。

2. 数値モデルの概要

(1) 簡易台風モデル

気圧力場を Schloemer の同心円分布で近似した簡易

* 正 会 員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 正 会 員 工修 清水建設株式会社 土木東京支店

*** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科

**** 正 会 員 工修 日本建設コンサルタント株式会社

な台風モデルである光田・藤井モデルを基本風場とする。これに、MASCON モデルで、地形により気流の方向や強さが変化する効果を考慮して、風域場を修正した台風モデルを用いる。以降、これを MASCON モデルと呼ぶ。

(2) メソ気象モデル

ペンシルベニア州立大学と米国気象研究所 (NCAR: National Center for Atmospheric Research) で開発されたメソスケール気象モデル、MM5 は、今日多くのユーザーを持っている。このモデルは、非静力学方程式系に基づいた、鉛直座標系には、系 (等圧面座標) を用いている。このモデルでは、パラメータ化した雲物理過程を用いており、使用する水平スケールや目的によって積雲パラメータを設定する。また、地表面境界スキーム等の物理過程もオプションで設定できる。解像度の異なる複数の計算領域を mother domain 上であれば、同時に計算することができ (multiple-nesting)、観測データ同化はナッジングによる四次元データ同化が可能である。豪雨予測やダウンバーストを再現する場合には、雲解像の非静力学気象モデル (例えば CReSS と命名された公開モデル) があるが、本研究ではこのような雲解像度のモデルは対象としていない。

(3) メソ気象モデルによる台風シミュレーション

メソ気象モデルを実行するためには、バックグラウンドデータ (境界条件, 初期条件) が必要であり、客観解析データが用いられる。これは天気予報のためのコンピュータシミュレーションに観測データを同化して作成されたデータで、地上物理量としては、海面更正気圧、地表面気圧、風ベクトル、気温、相対湿度、降水量等であり、上層物理量は、高度、風ベクトル、気温、相対湿度、上昇流等である。代表的な客観解析データは、日本の気象庁の GPV データ (全球: 水平 1.2 度格子, 領域: 0.2 度, メソ: 0.2 度格子)、米国の米国環境予測センター・米国大気研究所 (NCEP/NCAR)、欧州中規模気象予測センター (ECMWF) の全球の解析データがある。

全球モデルによる気象場の計算結果をバックグラウンドデータ (初期値, 境界値, 4 次元同化データ) として用いる。全球モデルによる気象場の計算結果は空間解像度が粗いため、台風のような局所的に大きく変化する気象場の再現は難しく、滑らかな気圧分布や緩やかな風速場となる。このため、台風中心付近の気象場を強制的に修正する方法が用いられる。本研究で用いたボーガス台風を作成する方法もその一例である。この方法では、まずバックグラウンドデータから熱帯低気圧の渦運動を抽出し除去する。次に、中心気圧深度、中心位置等の観測情報を用いて修正したランキン渦をボーガス台風として、渦運動を除去した箇所に挿入する。

(4) 積雲パラメタリゼーション

安定な降水 (空気塊が移動して地形にぶつかり、上昇することによって起こる降雨) には Grell モデルを用いた。このモデルでは、雲は上昇気流と下降気流による二つの定常状態の循環により変化する。雲を含む大気と周辺の大気とは、この循環の上端と下端を除いて直接的な混合はない。水分は全て 降水にかかわると仮定する。水平格子間隔が 10~30 km の計算に有効であり、10 km 四方程度の対流性降雨とのバランスの取れた計算が可能である。

一方、対流性の降水 (暖かい空気と冷たい空気が上昇・下降することによって起こる降雨) としては、Simple Ice スキームを用いた。これは、暖かい雨に氷晶過程のみを考慮したもので、0°C で必ず凝固・融解が発生し、過飽和の過程はないスキームである。

3. 強風場の再現性

(1) 計算方法

台風 9918 号による周防灘での海上風の風域場を対象として、光田・藤井の台風モデル、およびメソ気象モデル MM5 による 3 通りの海上風場のシミュレーションを行った。計算期間は 1999 年 9 月 24 日 0 時~9 月 24 日 23 時で、計算領域は、東経 131~133 度、北緯 33~34 度 25 分、格子間隔 (数) は水平 1 分×1 分、鉛直 10 m (120×85×201) とした。

MM5 の計算では、バックグラウンドデータとして、気象庁の 20 km×20 km 領域客観解析データを用いた。台風ボーガスは初期条件でのみ行い、4 次元データ同化は行っていない。図-1 に MM5 のドメイン 1 とベストトラックデータの台風中心の位置の比較を示す。また、水

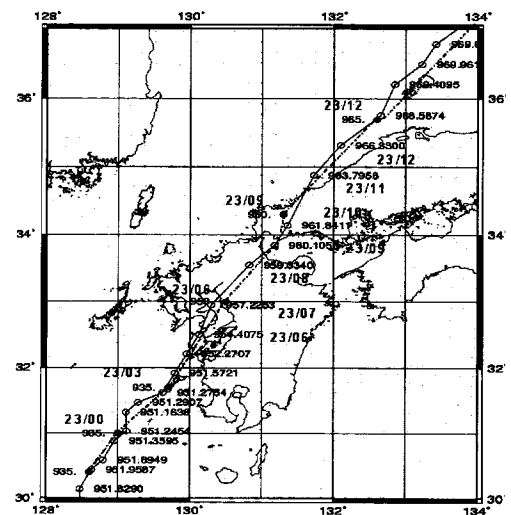


図-1 MM5 の計算領域と台風 9918 号のベストトラック

平格子間隔(数): 4.5 km (109×64), 鉛直方向 23 層とした。

(2) 再現結果

図-2 に, MASCON モデルにおいて計算領域を九州全域と周防灘海域とした場合の計算結果の相違の一例を示した。九州全域で計算した風速は若干小さくなるが, 風向に関しては計算領域の差は小さい。また, 図-3 には光田・藤井の台風モデルと MASCON モデルにより風域場を修正した海上風ベクトルの比較を示した。

さらに, 図-4 に MASCON モデルおよび MM5 により再現された地上大気圧および風速ベクトルの 1 時間毎の変化を示す。MM5 で計算された気圧分布は同心円とはならず, 風向も MASCON モデルによるものとは異なり, 台風中心通過時に西風成分が強くなっている。

これらから得られた海上風の風域場の評価を行うため, 周防灘海域での高潮を計算し, 広島での観測結果と比較した。その結果を図-5 に示す。これより, MM5 で計算された気象場で再現した高潮は観測結果と極めてよ

く一致していることがわかる。これら一連の計算結果から得られる主な成果は, 次のようである。(1) 計算領域を九州全域とした MASCON モデルの計算を行えば, 沿岸域での風速は若干小さくなり, 風向に関しては周辺地

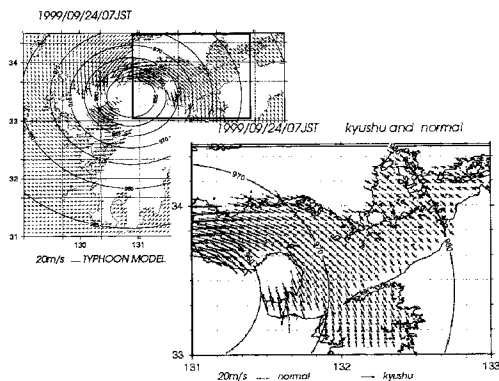


図-2 MASCON モデルにおける計算領域の影響の検討(濃いベクトルが九州全域計算)

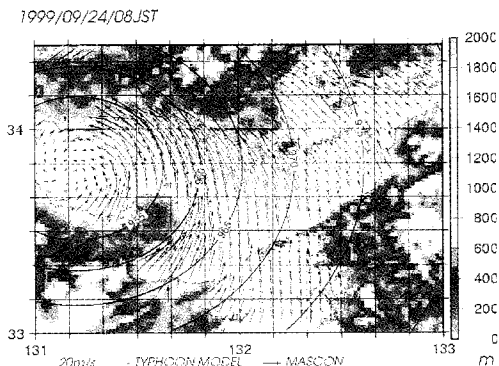
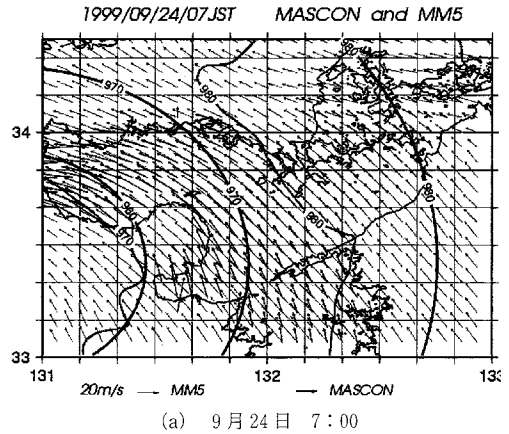
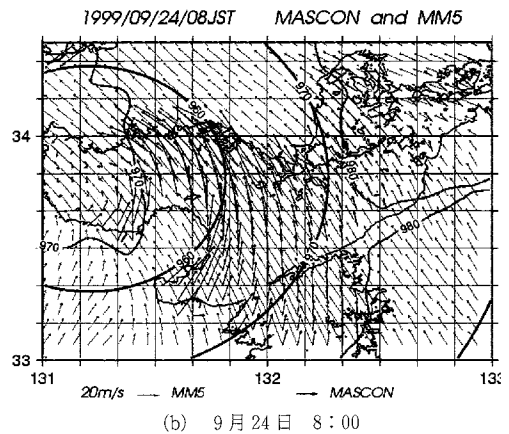


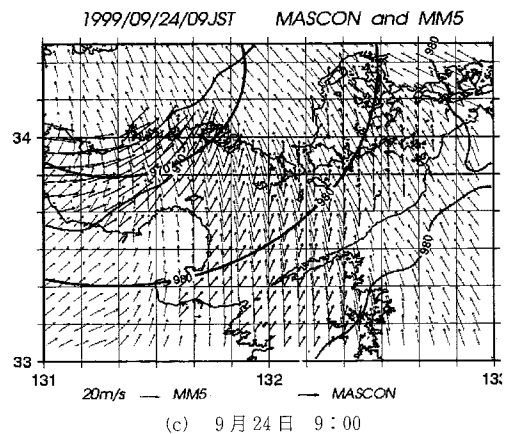
図-3 MASCON モデルによる風域場修正の効果



(a) 9月24日 7:00



(b) 9月24日 8:00



(c) 9月24日 9:00

図-4 MASCON モデルと MM5 との海上風ベクトルの再現結果の比較(MASCON の結果は海上風のみ表示)

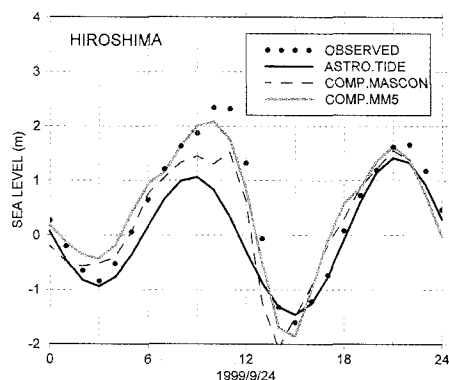


図-5 周防灘海域での高潮計算による風域場の評価

形を考慮したものと九州全域を取り込んだものとの差は小さい。(2)MM5による海上風の風速, 気圧場の再現性は, 簡易な台風モデルによるものよりは良いと判断される。

4. 豪雨の再現性

(1) 計算方法

MM5を用いて局所的な豪雨がどの程度再現できるのかの検討を行うために, 台風0215号の韓半島における豪雨のシミュレーションを行った。初期値・境界値にはNCEP/NCAR客観解析データを用いた。その解像度は1°メッシュであり, MM5では27 km, 9 km, 3 kmと3つの計算領域(ドメイン)を設定し, 順次メッシュを細かくし, 解像度を上げた。4次元データ同化をする際により細かいデータを導入するため, MM5に内蔵されているネスティング手法を用いずに, 順次アウトデータを初期値・境界値として用いる方法を採用した。また, 台風ボーガスはドメイン1の計算にのみ用いた。安定な降水のパラメタリゼーションはGrellモデルを, 対流性の降水はSimple Iceモデルを用いた。さらに, ボーガス台風で中心付近の気圧場, 風速場を修正すること, ネスティングにより解像度を高め地形の影響, 特に山脈の影響が再現できるようなスケールの格子網にすることで, 局所的な降水場の再現を試みた。

(2) 再現結果

一連のテスト計算結果からは, 韓半島の太白山脈の地形が, 降雨特性に与える影響が極めて大きいことが確認された。そのため, 格子間隔を3 km程度(降雨の物理過程にパラメタリゼーションを用いている限界の解像度)まで細かくした。図-6に計算領域(ドメイン1~3)の関係と土地利用データを示す。図-7にはドメイン1に(27 kmメッシュ)による計算期間における総降水量の平面分布, 図-8にはネスティングにより解像度を高めた

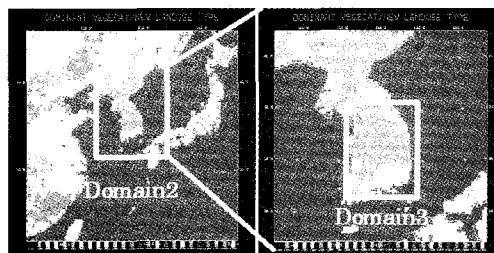


図-6 計算領域(Domain 1-3)の関係と土地利用データ

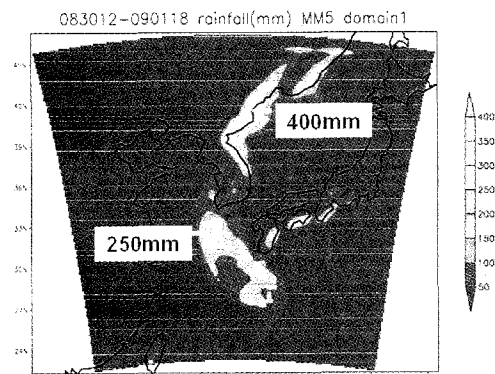


図-7 ドメイン1での計算期間の総降水量

計算結果であるドメイン2(9 kmメッシュ)の総降水量, 図-9にはドメイン3(3 kmメッシュ)における総降水量分布を示す。これらの図から, ドメイン3においては, 総降水量が約900 mmの豪雨が再現できていることが示される。また, 1 kmメッシュまで解像度を下げても, 結果はドメイン3と同様であった。

以上の結果から, メイン1の総降水量分布では, 韓国東北沿岸からシベリア東岸にかけての領域で, 降雨が発生しているが, その降水量は多いところでも400-450 mmである。ドメイン2では600 mmを超える総降水量が計算され, ドメイン3では, 韓国東北領域800 mmを超える領域が再現できている。この強雨領域は太白山脈の東側で, 湿った空気塊が山地斜面を上昇することによって起こる安定性の降水によるものであることが推測される。

Kangneungにおける前1時間観測降水量と, 観測点を含む数メッシュ(半径10 km程度)の範囲において最も降雨が出ている地点を選択し, そこにおけるMM5のドメイン3のKangneungの最近接格子点における前1時間降水量を, 00 UTCから18 UTCの間の時系列を比較すると, 図-10のようになる。総降水量はほぼ等しいものの, MM5では持続的な雨として再現され, ある時間の強い時間雨量は再現されていない。

083012-090118 MM5 domain2 rainfall(mm) Rmax=200km

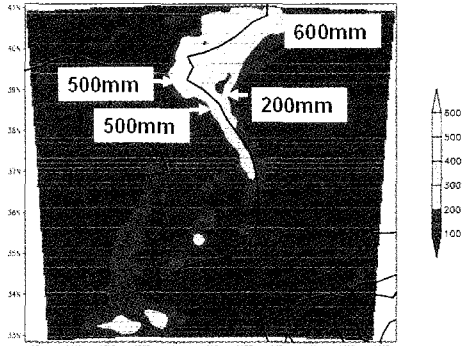


図-8 ドメイン2での計算期間の総降水量

082900-090118 MM5 domain3 rainfall(mm) Rmax=200km

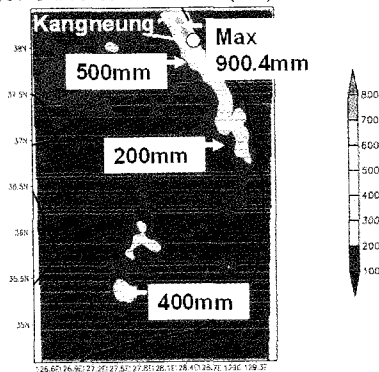


図-9 ドメイン3での計算期間の総降水量

このように、MM5 による計算結果は、総雨量は再現できるが、時系列として比較すると、短時間集中型降雨として再現できない。この理由として、①台風ボーガスの最大風速半径を一定としたため、台風の衰弱を表現できなかった、②MM5 の雲、降水の物理過程では局地的な豪雨の急激な変化の再現には限界がある、等の理由が考えられる。さらに、豪雨の局所的分布や、時間特性のより忠実な再現には、詳細な雲・降水物理過程を入れた雲解像度モデルを用いることが可能であるが、これもバックグラウンドの計算精度に左右されるので、数 km 程度の空間誤差は覚悟しなければならないであろう。

5. 結 語

以上、環境や災害への大きな外力である台風を対象として、これにより発生する局地的で強い風域場、降雨場の再現性を検討した。主な結果は以下のようである。

Kangneung rainfall (obs=128.86E,37.82N, MM5=128.44E,38.16N)

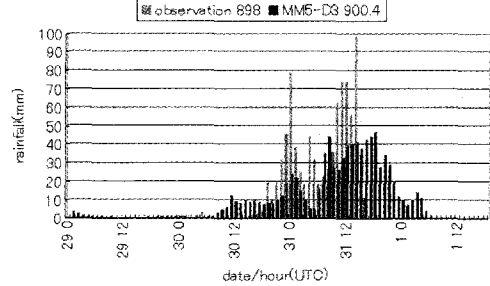


図-10 Kangneung における前 1 時間観測降水量と、観測点を含む半径 10 km の範囲にある MM5 で再現された最も多い降水量との比較

(1) 簡易な台風モデルと、MASCON モデルの風域場は、沿岸海域で地形の影響による風速の減衰と、風向の変化がみられるが、高潮の特性を大きく変えるほどの差異は無い。

(2) 高潮の再現性から判断すると、MM5 による海上風の風速、気圧場の再現性は、簡易な台風モデルや MASCON モデルによるものよりは良い。

(3) 台風による降雨場の数値予測、再現にもメソ気象モデルが適用できる。雲物理過程をパラメータ化して簡略化している MM5 でも、ネスティング等により水平格子を 3 km 程度まで細かくすることで、総降水量レベルでの豪雨の再現が可能であることを示した。この場合、精度向上のためには、ボーガス台風、4 次元データ同化を行う必要がある。

最後に、本研究は科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)、研究代表者 山下隆男、課題番号:14350266)、京都大学防災研究所一般共同研究(16 G-15、研究代表者:名古屋大学 水谷法美)、日本建設コンサルタント株式会社との共同研究の一部として行われた。

参 考 文 献

- 光田 寧 (1997): 台風による風災害の予測について、京都大学防災研究所年報、第 40 号 A。
- Davis, C. and Low-Nam, S. (2001): The NCAR-AFWA Tropical Cyclone Bogussing Scheme, Report for Air Force Weather Agency.
- Dickerson, M. H. (1978): MASCON-mass consistent atmospheric flux model for regions with complex terrain. J. Appl. Meteor., Vol. 17, pp. 241-253.
- CreSS web site:
http://www.tokyo.rist.or.jp/CRess_Fujin/CRess.top.html
- MM5 web site: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>