

詳細地形表現による局地豪雨の100 mメッシュ高解像度計算

竹見哲也

要 旨

近畿地方において局地豪雨をもたらした事例について100 m格子間隔での高解像度数値シミュレーションを行い、地形表現の違いによる降水の強度のモデルによる表現性について調べた。2008年7月28日都賀川増水時の豪雨、2009年8月1日丹波市豪雨、2009年8月9日台風9号に伴う佐用町での豪雨を解析対象とした。事例によりモデルによる再現性は異なり、必ずしもすべての事例でモデルが現実的な豪雨を再現できたわけではないものの、降水の強度別の頻度を解析することにより、モデル地形の違いによる降水量の再現性へのインパクトを調べることができた。100 m規模での微細地形の存在により強雨がより高頻度で出現することがわかった。

キーワード：集中豪雨，地形，数値気象予報，雲解像シミュレーション

1. はじめに

局地的な短時間強雨は、梅雨期や台風期のみならず夏季全般にわたってしばしば発生する。2008年に神戸市で発生した都賀川増水事故を引き起こした豪雨、あるいは2009年に兵庫県佐用町で発生した洪水災害を引き起こした局地豪雨が、近畿地方における最近の事例として記憶にあたりし。これら局地豪雨は空間スケールが極めて局所的かつ短時間で集中化するため、その発生を精度良く予測することは大変難しい。発生予測の困難さは、局地豪雨の現象そのものの理解がまだ十分でないことを物語っていると言える。

局地豪雨が発生する理由としては、単一の積乱雲がもたらす雨量が極めて多いこと、および同一地点において積乱雲が次々に発生または通過して雨量が増大することの二点が考えられる。総観規模ないし中規模で不安定な大気場が形成されれば、豪雨をもたらす積乱雲が発生しやすい状況となる。ただし、その不安定な大気場は積乱雲スケール（すなわち数kmから数10 kmの水平スケール）よりも大きな水平規模（すなわち数100 kmのスケール）で生じているため、積乱雲は潜在的にはその不安定大気場のどこにおいても同様に確からしく発生しやすいと考えられる。

しかし現実には多くの場合において、ある特定の箇所において雨が集中化している。したがって、雨

が集中化・局所化することには何らかの理由があるはずである。この原因のひとつとして、時間・空間的に定常かつ定在の条件を有する地形が関与しているものと考えられる。地形効果の雨の集中化・局所化に係る関与の度合いについての理解が深まれば、局地豪雨の発生の予測をより確度をもって行うことができるものと期待される。

このような認識をふまえて、それでは、降雨の集中化が地形に起因するとすればどの程度なのであろうか、あるいは地形の形状に応じて降雨の集中化の様子はどの程度変化するものなのであろうか。本研究ではこのような目的意識で、地形表現の違いによる気象予報モデル計算の結果がどう変化するものかについて、解像度100 mでの高解像度での数値実験を行うことにより調べる。特に、モデル地形を作成するための標高データとして、高分解能値として国土地理院（GSI）による数値地図50 mメッシュ値、低分解能値として米国地質調査所（USGS）の全球30秒メッシュ値（GTOPO30）の双方を用い、地形表現の違いによる局地豪雨の表現性へのインパクトに着目した。解析の対象事例は、最近の顕著事例として、2008年7月28日兵庫県南部における豪雨、2009年8月1日兵庫県丹波市および周辺地域での豪雨、2009年8月9日兵庫県佐用町での豪雨とした。このうち2008年7月28日の事例では神戸市を流れる都賀川での突発的な増水、2009年8月9日の事例では佐用町での河川の増水が発生し、人命を奪う痛ましい災害となった。

2. 気象モデルの設定と数値実験の手法

本研究で用いた気象モデルは米国国立大気研究センター（NCAR）が中心となって開発を進めている Weather Research and Forecasting（WRF）モデルである。Advanced Research WRF（ARW）バージョン 3.0.1.1（Skamarock et al., 2008）を用いた。WRFモデルは気象の素過程についての多様な物理モデル（パラメタリゼーション）が提供されており、ユーザーの意図に応じて自由に設定を変更することができる。本研究では、竹見（2009）と同様にして素過程の物理モデルの設定を行った。また計算領域は入れ子構造で設定可能な多段階ネスティング機能を利用し、本研究では4段階ネスティングにより格子幅を10 km/2.5 km/500 m/100 mと徐々に細密化する設定を行った。ネスティングの際の領域間の側面境界におけるデータのやりとりは、親領域から子領域への一方方向のみ（1 way）とした。鉛直の格子点数は40としている。ただし、計算領域については後述の通りに変更している。時間ステップ幅はCFL条件を満たすようにするなど計算不安定を回避するために設定する必要があり、本研究のように地形表現が高精度化した場合にはかなり安全側での時間ステップ幅が必要である。試行錯誤の上、第1領域から第4領域での時間ステップ幅はそれぞれ45秒、15秒、1.5秒、0.15秒と設定した。

本研究ではモデル地形の表現性の違いに着目するため、USGS全球30秒メッシュ値（GTOPO30）およびGSIの50 mメッシュ値（GSI50）の二通りの標高データを用いることにした。GSIデータの処理にはTakemi (2009)およびTakemi et al. (2010)で構築した処理システムを利用した。本システムは、WRFのプリプロセスプログラムであるWPSに組み込んだものである。

数値実験においては、第1および第2領域のモデル地形は共通してGTOPO30を用い、第3および第4領域のモデル地形の作成においてはGTOPO30を利用した場合とGSI50を利用した場合との二通りにしている。低分解能のGTOPO30を用いて第3および第4領域での高分解能モデル地形を作成すると、地形はかなり平滑化されたような場になる。一方GSI50を用いると高分解能格子によりかなり現実的なモデル地形が作成されることになる。一方、土地利用分布の情報はすべての計算領域において全球30秒メッシュ値（米国地質調査所Global Land Cover Characterization; GLCC）を用いた。

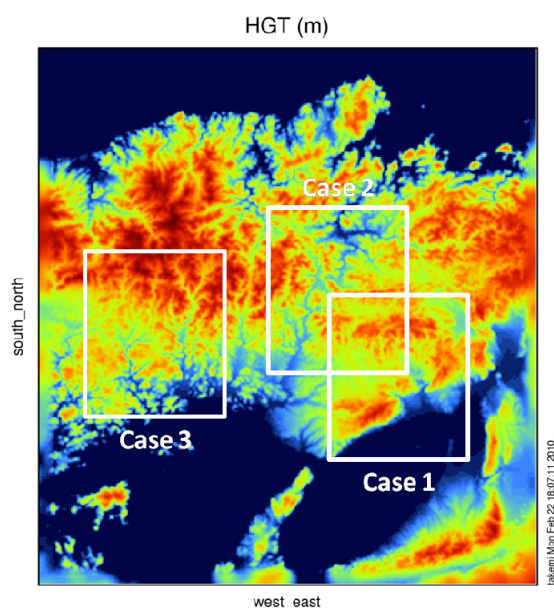


Fig. 1 Computational domains and surface topography for the numerical experiments. Domain 4 (indicated by white rectangles) for each case is nested in Domain 3.

モデル地形の違い以外のモデル設定は数値実験間で同一のものとすることにより、地形の表現性の違いによるインパクトを調べることにする。

初期値・境界値には、気象庁全球モデルGSMによる解析値またはメソモデルMSMによる解析値および米国環境予報センター（NCEP）の最終解析値（FNL）を用い、海面水温には気象庁MGDSSTを用いた。GSM、MSM、FNLは6時間間隔のデータセットであるが、MGDSSTは1日間隔でしかデータが存在しない。よってMGDSSTのデータを時間補間し、6時間間隔で初期値・境界値をモデルに与えた。

解析対象とした顕著な局地豪雨の事例のそれぞれの計算開始時刻および計算時間帯は以下の通りである。2008年7月28日神戸市豪雨（Case 1）では、2008年7月27日1200 UTC（第1および第2領域）または7月28日0000 UTC（第3および第4領域）開始で7月28日0900 UTCまでとした。2009年8月1日丹波市豪雨（Case 2）では、2009年7月31日1200 UTC（第1から第3領域）または7月31日1500 UTC（第4領域）開始で8月1日1200 UTC（第1から第3領域）または8月1日0000 UTC（第4領域）までとした。2009年8月9日佐用町豪雨（Case 3）では、8月8日1800 UTCから10日0000 UTC（第1および第2領域）または9日0000 UTCから10日0000 UTC（第3領域）または9日0600 UTCから9日1800 UTC（第4領域）までとした。

計算領域は、第1領域は、2008年の事例では2200 km × 2400 km、2009年の事例では1600 km × 1800 kmとして、総観場の特徴をできるだけ把握できる程度の広

さを確保した。これを親領域とし、この領域の初期値・境界値は先述の解析値から得られる。以下、第2領域は410 km×480 km、第3領域は163 km×175 km、第4領域は48 km×51 kmとした。Fig. 1に第3領域および第4領域を示す。またFig. 2には、Case 3における第4領域のGSI50およびGTOPO30によるモデル地形の違いを示す。計算格子間隔はともに100 mであるものの、用いる地形データの空間分解能の違いによりモデル地形の詳細な表現が大きく異なることが分かる。神戸市や丹波市での地形表現も同様に顕著な違いがあり、このような微細地形の表現の違いによる局地豪雨の再現性へのインパクトを調べる。

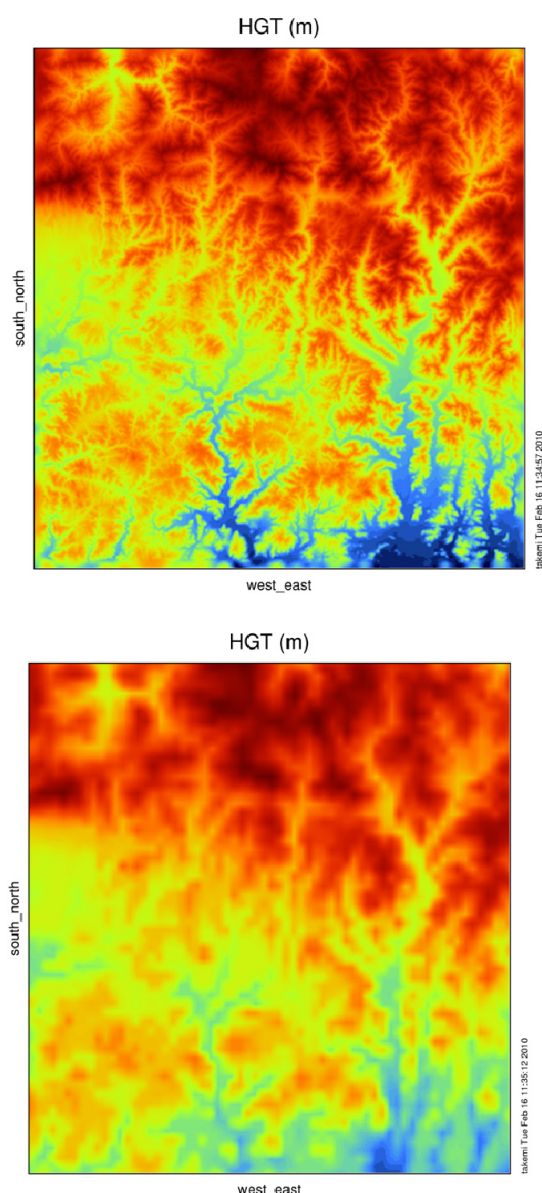


Fig. 2 The surface topography represented in Domain 4 for Case 3. The elevation datasets used are GSI50 (upper panel) and GTOPO30 (lower panel).

3. 計算結果

Fig. 3には、各事例における第3領域での積算雨量の分布を示す。この計算結果を気象庁による観測（気象台・アメダス）と比較すると、Case 1およびCase 2では定量的には若干の違いがあるものの空間分布のパターンはよく再現されており、一方Case 3では定量的にも空間分布においてもあまりよく再現できなかった。

Case 1では、六甲山周辺部での降水の集中化が再現されており、都賀川増水をもたらした強雨分布もよく表現されていることが分かる。また京都府北部の丹後半島を中心とした強雨域もよく現実と対応して再現されている。定量的には、モデル結果が現実と比べて過剰に降水を表現していたものの、この事例では空間分布は良好に再現されていたと言える。

Case 2では、モデル計算結果は定量的にはかなりの過小評価ではあるものの、丹波市周辺部を主として兵庫県での山間部における雨の集中化の様子は良好に再現されていると言える。

それらに比較してCase 3の再現性はあまり良くなかった。この事例は台風9号の接近に伴う豪雨であったため、本事例の豪雨のモデルシミュレーションにおいては台風9号の径路や強度をまず精度良く再現することが重要である。しかし、台風9号は熱帯低気圧から日本の南海上の比較的本州に近い海域において台風となったものであり、強度や進路の予測が極めて難しい事例であった。こういった台風に伴う豪雨の再現においては、少しの台風径路の再現の誤差が大きな影響を及ぼしてしまう。このことにより、今回対象とした事例のうち2009年佐用町豪雨の再現性が悪くなってしまったと考えられる。

このように豪雨の再現性には誤差があり、定量的な議論には限界がある。1節で述べたとおり、局地豪雨はランダム性の高い現象であり、不安定な大気場においては豪雨が発生するポテンシャルはどこにでも存在する。言い換えると、豪雨発生前の現実大気で生じている現象の再現性が少し異なることで、結果としての豪雨の再現性は大きく変化してしまうのである。しかし一方では、モデル地形の違いによる豪雨表現への影響は、異なる地形間の相対的なものであるため、定量的な再現性にはよらずに定性的には現れるものと期待される。すなわち、地形の違いを調べる感度解析としては、本計算結果は有効に活用できるものと考えられる。そこでここでは、降水量の階級別の頻度を解析することにより、地形表現のインパクトを調べることにした。

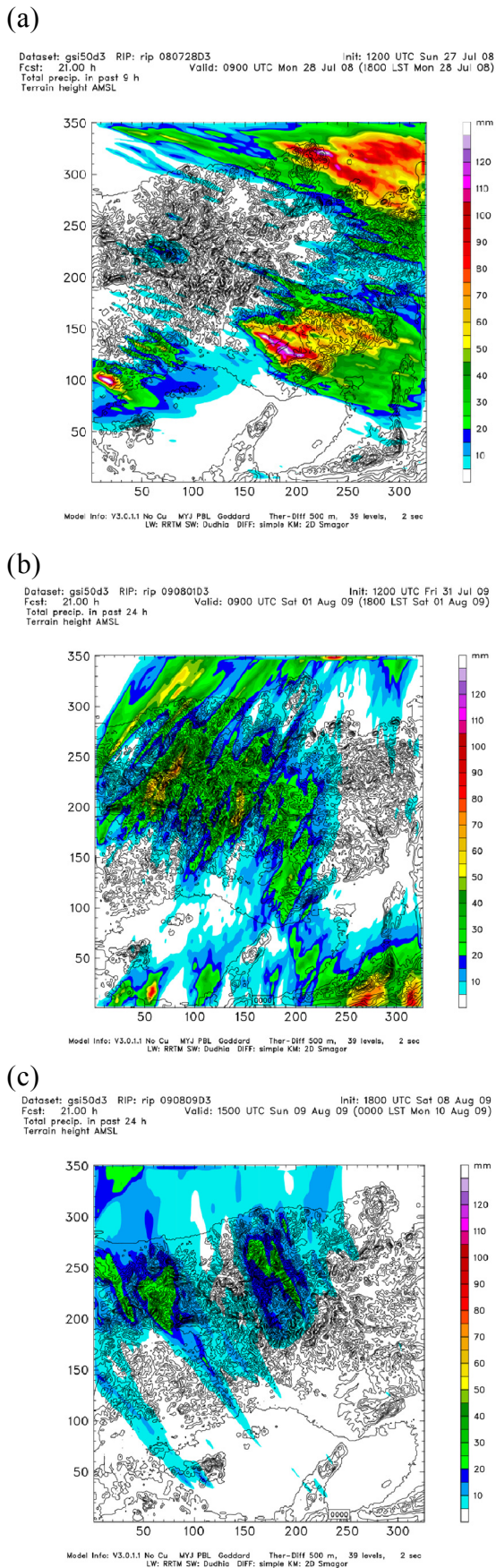


Fig. 3 The simulated total rainfall in Domain 3 for (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3.

Fig. 4は、各事例における降水量の頻度分布を示している。モデル計算結果は1分間隔で出力しており、Fig. 4の上から順に1分間隔での降水強度（時間雨量に換算）・1時間雨量・計算期間での積算雨量であり、全格子点で算出された値からの頻度を示している。Case 1およびCase 2においては、第3領域での各雨量のGSI50およびGTOPO30の場合の雨量はほぼ一致している。Case 3の場合にはモデル地形の違いにより雨量の頻度も異なっているものの、低い数値の側での頻度はGSI50およびGTOPO30の場合で似ている。このことから、500 m規模の格子間隔では、雨量（瞬間的な降水強度および積算での雨量ともに）の表現性にはモデル地形の違いはあまり顕著には現れないものと考えられる。

次に第4領域での雨量表現について見てみる。1分間隔での降水強度は、Case 2でのGSI50およびGTOPO30の場合の頻度分布はほぼ一致している。一方、Case 1およびCase 3では地形の違いによる若干の相違が認められる。1時間雨量では、傾向としてはGSI50のほうがより強い雨の頻度を多めに表現していると言えるが、ばらつきは大きい。積算雨量で見ると、GSI50の結果のほうがGTOPO30の結果よりも大雨の場合により多くの頻度で表現されていることが分かる。

このように地形表現の違いによる強雨の表現へのインパクトは、100 m程度の空間分解能で顕著に現れるものと言える。このように高分解能において地形の影響が認められるのは、微細規模での地形の変動により生じた風速場の違いが関係していると推測される。そこで各事例での計算結果から、地上での風速（水平成分）の頻度を調べてみた（Fig. 5）。雨量の場合と同様に、第3領域ではモデル地形の違いによる頻度の違いは顕著ではない。一方、第4領域においては、GSI50の場合の方がGTOPO30に比べて、より強い風速の場合での頻度が高めに表現されていることが分かる。地形の微細規模での変動性が風速場に影響を及ぼしているものと考えられる。

このような風速場の表現性の結果については、冬季における急発達する低気圧に伴う強風場を高解像度数値シミュレーションにより調べたTakemi (2009)あるいはTakemi et al. (2010)で指摘されたことと整合的である。また2004年台風18号の風速場の再現計算において地形の違いの影響を調べたOku et al. (2010)とも整合的な結果となっている。微細地形による地上風速場への影響は、低気圧や台風といった様々な強風の事例に共通して現れる特徴であると言える。

このように地形の影響が水平風速場に現れるということは、鉛直風速成分にも影響が及ぶものと考えられる。地上での水平風速の収束や発散が鉛直風速

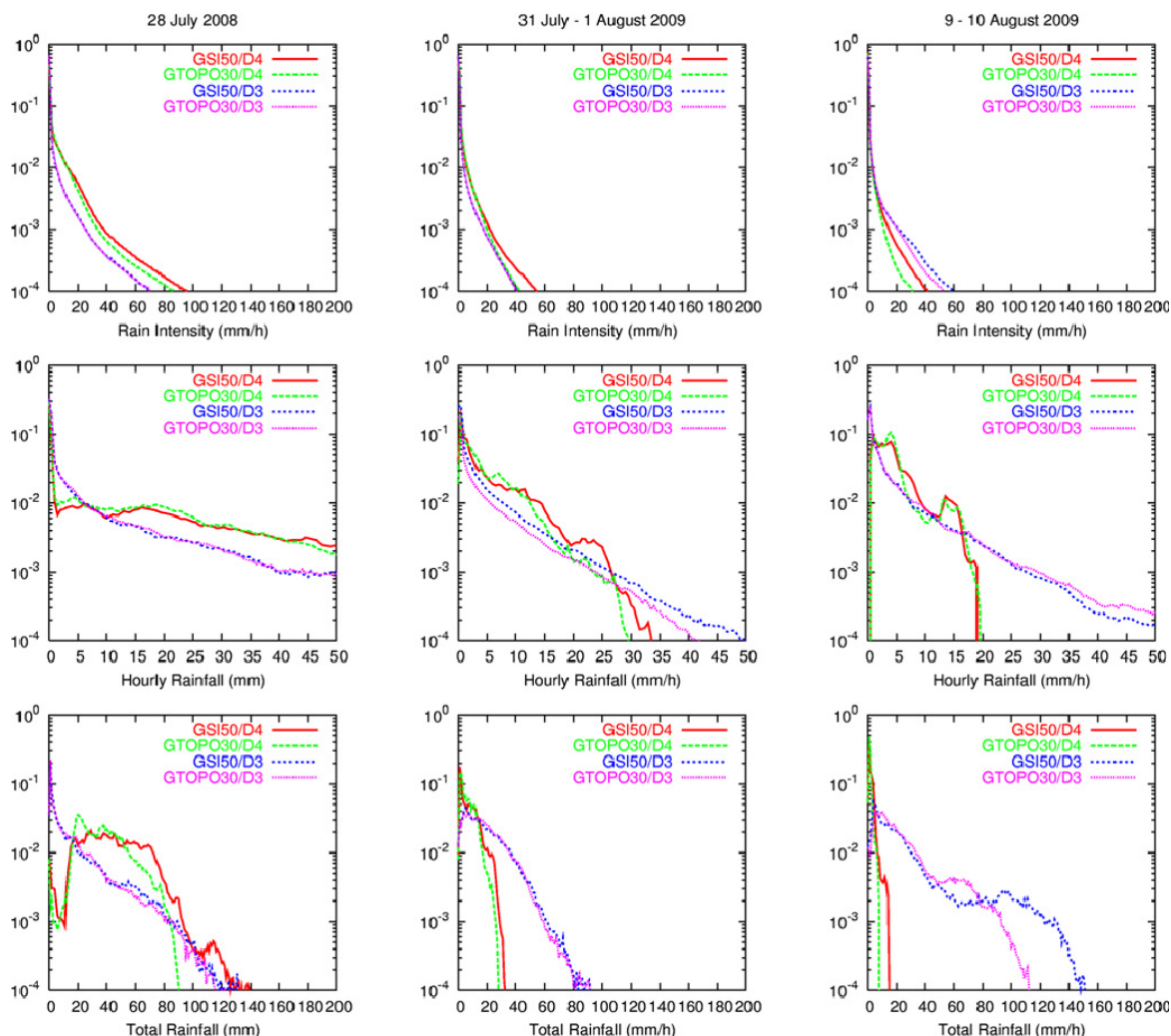


Fig. 4 Frequency distribution of instantaneous rain intensity (the first row), hourly rainfall (the second row), and total rainfall (the third row) in Domain 3 and 4 with the GSI50 or GTOPO30 terrain for the 28 July 2008 case (the left column), the 1 August 2009 case (the middle column), and the 9 August 2009 case (the right column). The frequencies are normalized by the total values.

の変化をもたらすためである。そこでFig. 5と同様に、鉛直風速の頻度を調べてみた (Fig. 6)。第3領域での鉛直風速の頻度にはモデル地形が異なっても大きな違いは認められない。しかし第4領域での鉛直風速の頻度分布を見ると、GSI50の場合のほうがより強い上昇流・下降流を表現していることが分かる。このことは水平風速の表現の違いと整合的であり、地上風系の表現の違いが鉛直風速場にも影響が及んでいるものと言える。

4. まとめ

気象モデルを用いて顕著な豪雨事例について100 mメッシュでの高解像度数値シミュレーションを行った。高分解能標高データである国土地理院数値地

図50 mメッシュ値と低分解能データの米国地質調査所の全球30秒メッシュ値の二通りの標高データを用いて100 mメッシュでのモデル地形を作成し、異なる地形表現による豪雨の表現性へのインパクトを調べた。

解析の対象としたのは、近畿地方で最近顕著な豪雨をもたらした3事例 (2008年7月28日都賀川増水時の豪雨, 2009年8月1日丹波市豪雨, 2009年8月9日佐用町豪雨) である。各事例での豪雨の定量的かつ空間的な再現精度には大きな差異があった。特に佐用町豪雨の再現精度が悪く、熱帯低気圧から急発達する夏季台風に伴う豪雨の再現性の困難さをあらためて示したものだと言える。しかしながら、地形表現の違いによる豪雨表現の感度解析においては、本計算結果は有効であると考えられるため、降水の頻度

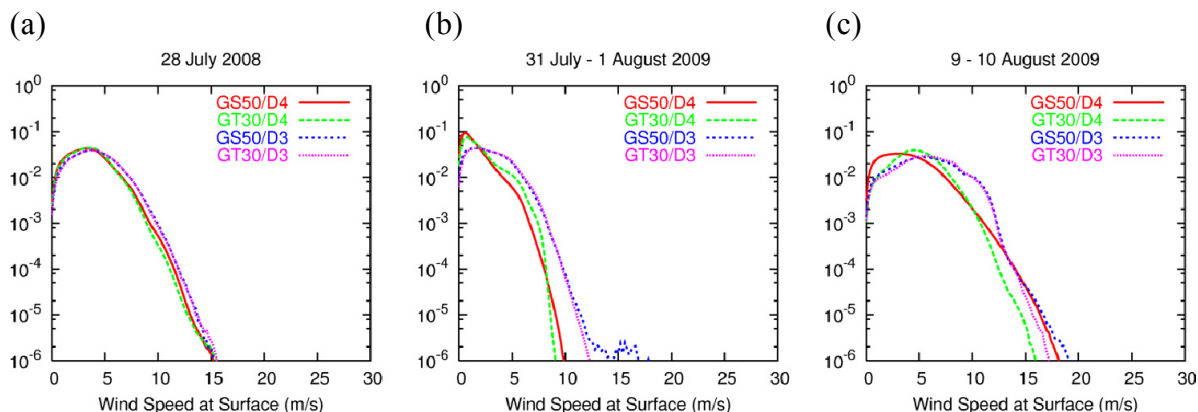


Fig. 5 Frequency distribution of surface wind speed in Domain 3 and Domain 4 with the GSI50 or GTOPO30 terrain for (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3.

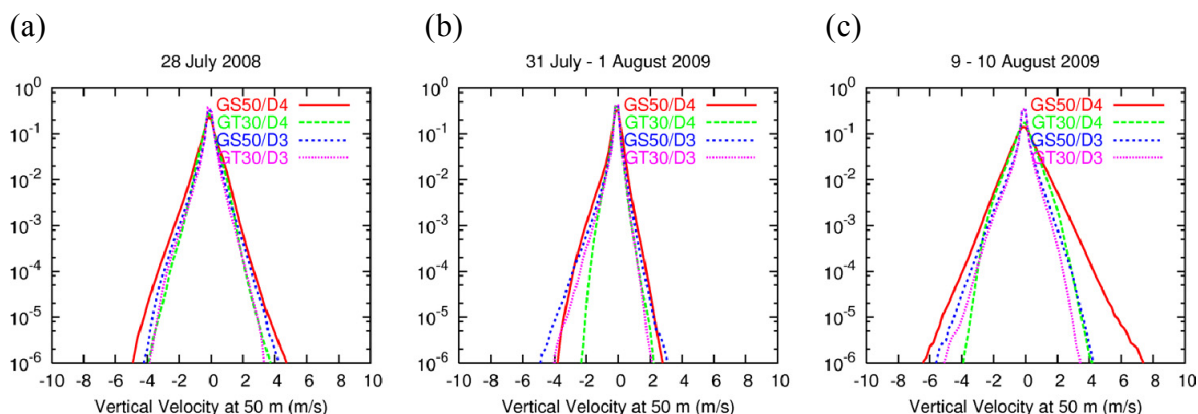


Fig. 6 The same as Fig. 5, except for the vertical velocity.

分布により検討した。100 mの分解能において、地形表現の違いによる豪雨の表現性に違いが現れた。すなわち、高分解能化により極値の表現がより強調されるものと言える。

豪雨の予報という観点からは、豪雨をもたらす積乱雲を不安定大気場において時空間で正確に再現する必要があるため、高解像度化が必ずしも有利には作用しない。このことが、最近の現業の数値気象予報の場においては高解像度化よりもアンサンブル予報による予測精度の向上を目指していることと関連している。本研究で得られた知見としては、高解像度計算のメリットは地形表現の高精度化による極値表現の改善にあるという点である。将来的には、数km格子程度でのアンサンブル計算と高解像度計算とを併用することで、極端事例の予測精度の向上が図れるものと期待される。

謝 辞

本研究は、国土交通省建設技術開発助成制度による研究課題「災害気象・水象のリアルタイム予測技術開発と仮想風速計、仮想雨量計および仮想波高計の構築」（代表・間瀬肇教授）の一部として実施されました。また文部科学省・日本学術振興会科学研究費若手研究(B)19740287による支援も受けました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 竹見哲也（2009）：2008年7月28日に近畿・北陸地方で発生した局所的豪雨の高解像度気象シミュレーション，京都大学防災研究所年報，第52号B，pp. 421-430.
- Oku, Y., Takemi, T., Ishikawa, H., Kanada, S., and Nakano, M. (2010): Representation of extreme weather during a typhoon landfall in regional meteorological simulations: a model intercomparison study for Typhoon Songda (2004). Hydrologic Research Letters, Vol. 4, pp. 1-5, doi: 10.3178/hrl.4.1.

- 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 Tech. Note, NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Takemi, T. (2009): High-resolution numerical simulations of surface wind variability by resolving small-scale terrain features, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 57, pp. 421-428.
- Takemi, T., Kusunoki, K., Araki, K., Imai, T., Bessho, K., Hoshino, S., and Hayashi, S. (2010): Representation and localization of gusty winds induced by mesocyclones with a high-resolution meteorological modeling, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 58, pp. 121-130.

The 100-m-Mesh Numerical Simulations of Severe Local Rainstorms by Representing Complex Terrain Features

Tetsuya TAKEMI

Synopsis

Representations of heavy rainfall in numerical simulations at grid resolutions of $O(100\text{ m})$ are investigated. The effects of model terrains reproduced for the simulations on the rainfall representations are specifically focused. Downscaling experiments at 500 m and 100 m grids with the Weather Research and Forecasting (WRF) model are performed with the use of high-resolution and coarse-resolution digital elevation model (DEM) data. Three heavy rain cases that occur in the Kinki district in 2008 and 2009 are examined. Stronger short-term rain intensity is reproduced in the case of high-resolution DEM terrain.

Keywords: local heavy rainfall, topography, numerical weather prediction, cloud-resolving simulation