

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740287
 研究課題名（和文） 複雑地形の影響を受けるメソ擾乱の極値予報に関する超高解像度モデリング
 研究課題名（英文） High-Resolution Modeling on the Prediction of Extreme Values for Mesoscale Disturbances Under the Influence of Complex Topography
 研究代表者
 竹見哲也（TAKEMI TETSUYA）
 京都大学・防災研究所・准教授
 研究者番号：10314361

研究成果の概要：

複雑・急峻地形による強雨・強風の極値の発生機構を調べるため、細密標高データを用いて、次世代メソ気象モデル WRF による集中豪雨や突風をもたらした気象擾乱の高解像度数値シミュレーションを実施した。梅雨前線に伴う豪雨、夏季の突発性局地豪雨、冬季の低気圧通過に伴い生じる日本海沿岸地域での強風を解析対象として選択した。計算格子間隔を細密化することにより、気象擾乱に伴う強雨・強風の微細構造がより詳細に表現することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：気象学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：メソ気象擾乱、気象予報、気象災害、集中豪雨、突風、複雑地形

1. 研究開始当初の背景

台風・梅雨前線・低気圧の活動に伴い発生・発達するメソ擾乱は集中豪雨や突風などの強雨・強風災害をもたらす原因であり、メソ擾乱の発生や発達を正確に予測することが防災の観点から極めて重要である。特に甚大な被害が生じるのは、短時間に集中する強雨や瞬発的に発生する強風といった現象が局所的に発生する場合である。より短期間そしてより局所的な強雨や強風は、急峻な地形での急な河川の増水および平野部での洪水

といった水災害、建築構造物の破壊といった風災害をもたらすため、それらの現象を高精度で予測することが被害を最小限に抑えるために必要不可欠である。すなわち、数分から数10分間に降る降水量や瞬間風速といった極値の予報が現実的に求められる情報である。

一方、計算機資源の絶え間ない発展によって、メソ擾乱の数値シミュレーションはより高解像度かつより広領域で実行することが現実的となってきている。地球シミュレータ

の出現により 1000 km 四方の領域を水平格子幅 1 km で覆った台風や梅雨活動の雲解像シミュレーションも可能となり、それによる現象の再現精度も飛躍的に向上してきている。地球シミュレータの出現は海外での大規模計算機システムの開発を触発し、従来の雲解像シミュレーションに必要とされていた格子幅 1 km よりもさらに細かい解像度でメソ擾乱の数値計算を行うことが研究面での主流になりつつある。

これまで本研究課題代表者は、メソ気象モデルや雲解像モデルを用い、メソ擾乱(メソ対流系や台風・梅雨前線・低気圧に伴う擾乱)とそれにより生じる強雨や強風の構造の数値解析を行っている。その中で本応募課題の着想に至った事例を簡単に紹介する。ひとつは、2004年12月5日に東京において観測史上1位となった最大瞬間風速を生じさせた爆弾低気圧の事例である。低気圧の通過に伴い強風が観測されたが、興味深いのは、東京都心の大手町と丸の内とで強風の立ち上がりの時間が約1時間ずれていることである。両地点は、大手町は地上高度75mのビルの屋上、丸の内は180mのビルの屋上であり、場所は1kmも離れていない。一方、館山の強風の立ち上がりは東京都心よりも3から4時間先行している。メソ気象モデルMM5によりこの事例を調べると、東京の格子点では強風の立ち上がり時刻に高度依存性(高いほど強風の立ち上がり時刻が早い)があり、一方の館山ではそのような依存性がないことが分かった。この原因は東京の上流側に位置する箱根・伊豆の山地にありそうで、地形の影響が、東京上空の高度にしてわずか100m程度の違いでも強風の時間変動が異なる点に現れているのではないかと考察した。

本応募課題の着想に至ったふたつ目は、ネスティングにより111m格子幅までスケールダウンした場合に見られる局地循環の構造の解析によってである。風力エネルギーの利活用の観点から、根室半島を対象領域として接地層での風の時空間構造をメソモデルMM5によって解析を進めた。格子を細かくして地形をより詳細に表現したことで細かい谷筋の風が再現されたことが分かった。

以上のことから、地形に起因した風の変動は至るところで見られるものであり、地形が複雑であればあるほど風の乱れの構造も顕著になるのではないかと想像される。そして、複雑な地形の影響は風だけでなく雨にも現れ、それらが災害に繋がるメソ擾乱の極値を与える場合も多いのではないかと考えられる。複雑地形をより精度よく表現することでメソ擾乱の再現性、特に極値予報の精度が向上するのではないかと期待される。そしてそのためには、乱流モデルが適切に働く程度の超高解像度での計算が必要不可欠であり、モ

デルに含まれる様々なフィルタリング効果を考慮すれば、100mの格子解像度は必要であると言える。実際、研究代表者が行なった晴天時の対流混合層の数値シミュレーションにおいては、格子幅を100mにまで細かくすると慣性小領域の乱流スペクトル $-5/3$ 乗則が表現されるようになることを確認している。

2. 研究の目的

台風・梅雨前線・低気圧活動に伴い発生するメソ擾乱は強雨・強風災害をもたらす要因であり、メソ擾乱の発生や発達を正確に予測することが防災上極めて重要である。特に甚大な被害が生じるのは、短時間に集中する強雨や瞬発性の強風といった現象(「極値」)が局所的に発生する場合である。より極端な現象ほど、急峻地形での河川の急増水や複雑地形での突風などというように、急峻な地形において顕著に現れると言える。そこで本研究では、複雑地形の影響がメソ擾乱の発生や発達にどのように現れ、さらにその影響がメソ擾乱に伴い生じる強雨や強風の極値の出現にどのように寄与しているのかを明らかにすることを目的とする。日本は国土の約7割を山地で占められており、急峻かつ複雑な山地が少なからずメソ擾乱の発現に影響を及ぼしているはずである。本研究では、梅雨前線や局地前線に伴う集中豪雨および台風・低気圧の通過に伴う突風を対象事例として、これらの強雨・強風の発生機構に及ぼす地形の影響を検出する。極値予報のために、国土地理院の高分解能標高データ50mメッシュ値を用いて、次世代気象モデルWRFを用いて水平格子幅100mでの高解像度数値シミュレーションを実施する。メソ擾乱に伴う極値の再現を試み、極値予報の精度向上に資する。

3. 研究の方法

気象モデルWRFを用いた高解像度でのシミュレーションを実施するために、国土地理院高分解能標高データ50mメッシュ値をWRFのプリプロセッサであるWPSで処理できるルーチンを組み込み、水平格子幅100m程度での高解像度シミュレーションを実行できる環境整備を構築した。

複雑地形上での数値シミュレーションの実行にあたっては、数値的な安定性と複雑地形のモデルでの高精度表現という相反的な要請を同時に満たさなければならないため、実行環境・条件設定を確定するための予備計算を多数実施した。その上で、メソ対流系・台風・低気圧などの気象擾乱に伴う強雨・強風の本実験に必要な設定を確定させた。数値シミュレーションに必要な初期値・境界値のための格子点気象データとしては、気象庁MANALおよびGANAL、海面水温MGDSSTおよ

び米国国立環境予報センター (NCEP) 最終解析値 (Final Analysis) を利用した。

数値シミュレーションの実行には、京都大学学術情報メディアセンター大型計算機システムおよび京都大学化学研究所スーパーコンピュータラボラトリー超並列計算サーバを利用した。

強風・強雨の主要な事例についての条件設定は以下の通りである。

(1) 日本海沿岸地域での低気圧に伴う強風

計算領域を4重ネストで設定し、第1領域は日本列島の主要部をカバーするように設定し、第4領域は解析対象領域である庄内平野およびその周辺地域をカバーするようにした。水平格子幅は第1領域を8.1 km (9 km) として内側領域に入るほど徐々に細密にして第4領域は300 m (120 m) とした。モデル上端高度は50 hPaであり鉛直格子点数は40である。初期値・境界値には気象庁 MANAL・MGDSST および NCEP Final Analysis を用いた。境界層乱流混合には Mellor-Yamada-Janic スキームを用いている。解析対象は2007年から2008年の冬季の突風事例である。突風事例の抽出は以下の通り行なった。庄内平野で展開されている地上気象観測網の風速データにより、25 m/s 以上の風速を観測した事例をまず抽出し、品質チェックを施した上で風速の立ち上がり10 m/s 以上の場合を「突風」として検出した。2007年10月から2008年3月までの期間で計23日が抽出された。本研究では、これら抽出事例に対して庄内平野で突風が観測された時刻を中心とした期間(第4領域での計算期間は事例毎6~18時間)で領域気象計算を行った。

(2) 2008年7月28日兵庫県南部豪雨

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 と細密化した。解析対象事例の総観場の特徴は、台風8号が日本南海上に西進しつつ日本海上に停滞前線が位置するというものであった。このような総観場をモデルで捉えるため、モデルの第1領域は2200 km x 2400 km とした。第3領域は兵庫県・大阪府・京都府を覆う163 km x 175 km、第4領域は六甲山周辺30 km x 25 km とした。第3および4領域のモデル地形は国土地理院50 mメッシュ標高データにより作成した。物理過程のうち局所豪雨の再現には境界層過程および雲微物理過程が重要である。本研究では、それぞれ Mellor-Yamada-Janic スキーム、6種類の水物質を予報する Goddard スキームを用いた。初期値・境界値には気象庁および NCEP の解析値を用い、海面水温には MGDSST を用いた。計算の初期時刻は2008年7月27日21時(日本時間)とした。

以上の事例のほか、2004年7月新潟・福島豪雨のシミュレーション実験も実施しているが、ここではその内容は割愛する。

4. 研究成果

(1) 日本海沿岸地域での低気圧に伴う強風

解析対象とした突風事例についてシミュレーションされた格子点別の風速時系列において平均値に対する標準偏差の割合(すなわち風速の変動の度合い)の空間分布を調べた結果、風速の変動性は、海上で大きい場合、あるいは陸上で大きい場合など、事例毎に大きく異なることが分かった。各事例で気象状況を調べてみると、メソスケールの対流性擾乱の活動が顕著な場合には海上で変動性が大きくなり、寒冷前線通過後の寒気吹き出しのような場合には陸上で変動性が大きくなることが分かった。全事例における平均風速と最大風速の空間分布を調べると、平均風速は予想通り海上で大きい値であった。これは海の粗度長(0.01 cm)が陸上での粗度長よりも小さいためである。海上での強風域が庄内平野にまで拡がり、内陸に向かって徐々に弱まっているのが示された。最大風速の分布を見ると、海上の強風域が海岸線に平行して位置する線状の丘陵の間隙や丘陵を越えて庄内平野部に侵入している様子が分かる。特に強い最大風速の領域は、丘陵の間隙の下流に線状に伸びていることも見て取れる。海岸線に平行して位置する丘陵という微細地形が局所的な強風の出現に影響を及ぼしていることが高解像度シミュレーションにより再現され、気象擾乱の構造のみならず微細地形も突風の強さに影響していると言える。

また、2007年12月1日から2日の夜間、日本海を東進したトラフに伴い発達したメソ降水系が庄内平野を通過し、山形県酒田市内において建築物の一部損壊や飛散、電線の切断による停電、農作物への被害といった災害が生じた。本事例について数値シミュレーションを行い、メソ擾乱およびそれがもたらす突風の再現性について検討した。

線状降水系の発達に伴い、観測されたような微細規模の渦構造・渦列がモデルでも再現された。気温の水平勾配が大きなフロント付近において、相対湿度の鉛直成分が局所的に大きくなる領域、すなわち竜巻状渦がモデルで再現された(図1)。大きな相対湿度の鉛直成分(10^{-2} 以上)を持つ渦が列をなして複数形成されていることが分かる。これら渦の形成は、フロント前面において生じ、雲の発達による影響を受けている。地上風速の分布を見ると(図2)、この強い渦の位置において風が局所的に20 m/s以上にまで強まっている様子が見て取れる。この渦および強風域の水平スケールは数100 m程度であり、渦は「マイソサイクロン」と分類されるべき現象である。また強風域の局所性は、微細規模の渦が現実的な強度でモデルで再現されたためであると考えられる。すなわち、組織構造を持った

気象現象についてモデルで現実的な空間規模や強度で表現されれば、強風や突風といった災害をもたらすほどの風速変動も定量的にモデルで表現されるものと言える。

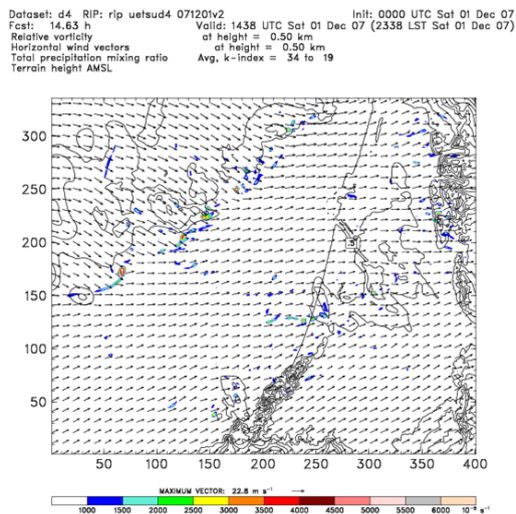


図1: モデル時刻12月1日23:38における高度500 mでの相対渦度の鉛直成分(シェード)および雲域(実線)

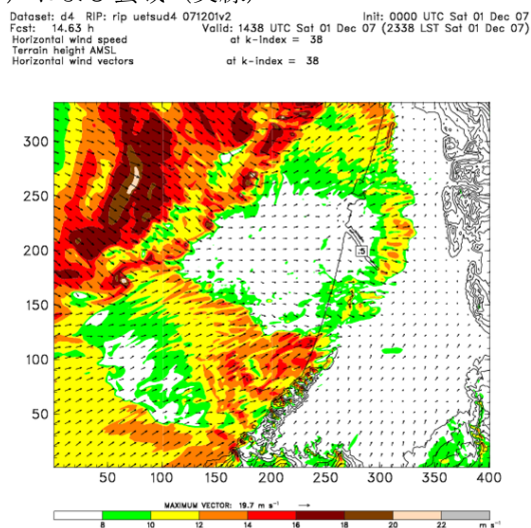


図2: 図1と同様、ただし地上風速(シェード)と風ベクトル

以上より、組織構造を持った気象擾乱の微細規模構造(この場合は渦)を再現することにより、地上での風速分布も観測とよく似た特徴をモデルで表現することができた。すなわち、組織構造を持った気象現象についてモデルにおいて現実的な空間規模や強度で表現されれば、強風や突風といった災害をもたらすほどの風速変動も定量的にモデルで表現されるものと考えられる。

- (2) 2008年7月28日兵庫県南部豪雨
 兵庫県南部で局所的な強雨が生じ都賀川

流域で増水災害が発生したのは、7月28日14時から15時の間である。この強雨に対応する降水現象はモデルでは28日13時から14時において表現された。図3は28日14時における1時間積算雨量である。六甲山地において雨が局所的に存在する様子が表現されている。積算雨量は最大で25 mmであった。観測値がないためモデル雨量を実際の雨量と比較できないが、三田では14時から15時の観測雨量は53 mmであり、第3領域でのモデル雨量は30 mm程度であった。第4領域での雨量は定量的にはそれに対応する程度の再現性だと考えられる。ここで強調すべき点は、雨量分布の局所性が高いということである。すべての計算領域で地形データにGTOPO30を用いた計算によると、雨量分布は図1ほど局所的に集中する様子は表現できていなかった。図4は28日13時における海拔高度1.5 kmでの上昇風速の分布を示す。六甲山地の北側の斜面において強い上昇流が局在していることが分かる。局在化した上昇流に対応して高い降水物質量の分布がより局所化する。もちろん、積乱雲発生ランダム性のため地形を細かく表現すれば強雨の再現性が向上するとは限らない。しかし、地形を高精度に表現することで雨の局所化の様子がモデルでより良く再現できる可能性がある。

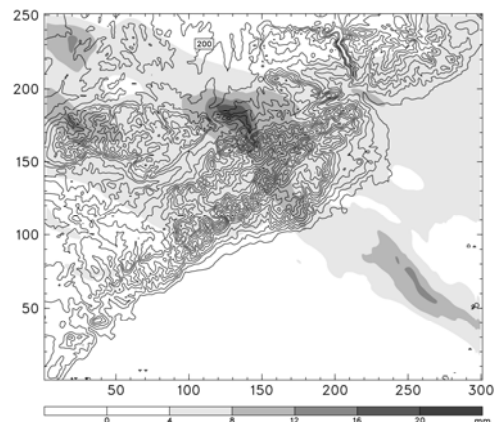


図3: モデル時刻28日14時における1時間積算雨量分布(陰影)および標高(等値線、50 m間隔)。

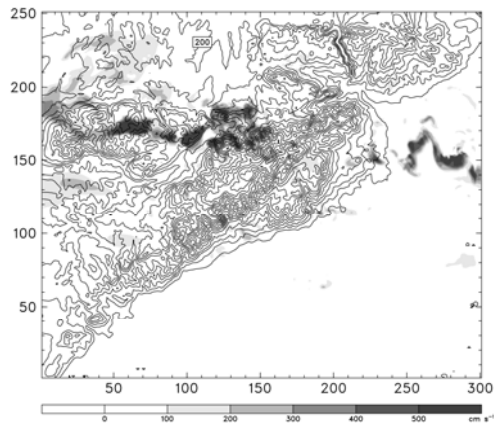


図 4：図 4：モデル時刻 28 日 13 時における高度 1.5 km での上昇風速（陰影、1 m/s 間隔）および標高。

以上より、地形を高精度に表現した高解像度気象シミュレーションにより、強雨および強風が局所的に強化されるが気象予報モデルでより良く再現できる可能性があることが示されたと言える。

(3) 今後の展望

微細規模渦を伴うメソ降水系について格子幅 100 m 程度での高解像度気象シミュレーションを行い、強風事例に関しては、観測された最大瞬間風速の絶対値を再現することはできなかったものの、渦構造とそれに伴う強風分布ならびに最大風速の出現分布の特徴をある程度表現することができた。さらに地形の微細構造に対応した風速変動も表現することができた。強雨事例については、時間雨量の極値は再現することができる可能性が示された。しかし、気象擾乱および地形の影響による強雨・強風の極値の絶対値表現については、まだ課題は多い。強風の出現特性については、乱流運動エネルギーや最大・平均風速比といったパラメータによって診断することが可能であると考えられる。しかし、乱流過程のモデル化の問題により、突風の絶対値の再現には単にモデル解像度を上げるだけでは不十分であると考えられる。本研究課題においては、高解像度領域において Large-eddy simulation (LES) 手法の適用を目指したが、計算不安定や計算機資源の制約などの問題により、実際には LES を利用することができなかった。そのため、本研究課題で用いた乱流モデルはレイノルズ平均タイプのモデルである。したがって、非定常性の強い状況に伴う極値表現は極めて困難である。今後は、計算領域内部にさらに高解像度の LES 領域を埋め込みシミュレーションを行なうことが可能となるような条件設定の構築、より簡易な手法での非定常性表現が可能となる乱流モデルの構築が必要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 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. (査読有)
- ② 竹見哲也, 中山浩成, 2009: 微細規模大気流れの気象モデルと CFD モデルの融合解析. 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol. 28, No. 1, pp. 13-20. (査読無)
- ③ 竹見哲也, 猪上華子, 楠研一, 加藤亘, 鈴木博人, 今井俊昭, 別所康太郎, 中里真久, 星野俊介, 益子渉, 林修吾, 福原隆彰, 柴田徹, 2008: メソ気象擾乱に伴う地上近傍の強風変動に関する高解像度気象モデル解析. 風工学シンポジウム論文集, Vol. 20, pp. 25-30. (査読有)
- ④ 辰己賢一, 竹見哲也, 石川裕彦, 2008: WRF モデルを用いた高解像度気象シミュレーションシステムの構築: 豪雨の事例解析. 京都大学防災研究所年報, 第 51 号 B, pp. 437-448. (査読無)
- ⑤ Takemi, T., 2007: Environmental stability control of the intensity of squall lines under low-level shear conditions. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D24110, doi:10.1029/2007JD008793. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- ① Takemi, T. High-resolution modeling analysis of hazardous winds associated with mesoscale disturbances for the safety of railway transportation system in a coastal area. AMS 89th Annual Meeting Symposium on Urban High Impact Weather, 2009 年 1 月 11~15 日, 米国フェニックス
- ② 竹見哲也, 楠研一, 今井俊明, 鈴木博人, 別所康太郎, 中里真久, 益子渉, 林修吾, 星野俊介, 猪上華子, 福原隆彰, 柴田徹, 加藤亘, 冬季気象擾乱に伴う地上近傍での強風変動の高解像度モデル解析. 日本気象学会 2008 年度秋季大会, 仙台, 2008 年 11 月 19 日
- ③ 竹見哲也, メソ気象擾乱通過時の地上近傍の強風の構造・変動に関する高分解能気象シミュレーション. 日本流体力学会年会 2008, 神戸, 2008 年 9 月 4 日
- ④ 竹見哲也, 微細地形の影響による風の変

- 動性に関する高解像度数値シミュレーション. 第 57 回理論応用力学講演会, 東京都港区, 平成 20 年 6 月 11 日
- ⑤ 竹見哲也, 高分解能標高データを用いた局所風の数値シミュレーション. 日本気象学会 2008 年度春季大会, 横浜, 2008 年 5 月 20 日
 - ⑥ Takemi, T., S. Hatamura, Microscale analysis of surface wind variability by resolving small-scale terrain features in high-resolution simulations. AGU 2007 Fall Meeting, 米国サンフランシスコ, 2007 年 12 月 10~14 日
 - ⑦ 竹見哲也, 超高解像度モデルによる局所的な風の解析と予測. 日本気象学会関西支部例会, 岡山市, 2007 年 11 月 10 日
 - ⑧ 竹見哲也, 益田精治, 北陸地方における梅雨期の集中豪雨と環境の安定度. 日本気象学会 2007 年度秋季大会, 札幌, 2007 年 10 月 15 日

[その他]

ホームページ等

<http://ssrs.dpri.kyoto-u.ac.jp/~takemi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹見哲也 (TAKEMI TETSUYA)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 10314361