

高分解能気象モデルによる2011年3月福島県東部の局所的な気流の解析

竹見哲也

要 旨

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって生じた原子力発電所施設からの放射性物質の拡散問題を考えるための基礎情報として、複雑地形における局所的な気流の時空間変動の特性を高分解能気象モデルによる数値シミュレーションによって解析した。水平格子幅400 mの高分解能計算によって、地形の微細構造に対応した風速変動の微細性や局所性が表現された。地形が風速変動に及ぼす影響は、地上近傍のみならず地上高200 mでの風速にまで認められた。地上近傍および大気境界層の中下層での風速変動を解析する上で、複雑地形を適切に表現できる高分解能計算は必要不可欠である。

キーワード：局地風，大気境界層流れ，地形，領域気象モデル，福島第一原子力発電所

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は、東北地方を中心に地震動・津波による甚大な被害を及ぼしただけではなく、原子力発電施設に被害を与えることで放射性物質の放出事故をも引き起こした。東京電力福島第1原子力発電所（以下、福島第1原発）からの放射性物質の大気中への放出によって、原発近傍地域のみならず福島県を中心に東日本の広域で環境汚染が生じた。地域規模・領域規模・地球規模の様々な空間スケールで、福島第1原発から放出された放射性物質が環境中にどのように拡散してどのように地表に降下したのかについて解析が進められている（Chino et al., 2011 ; Morino et al., 2011 ; Takemura et al., 2011 ; Yasunari et al., 2011 ; Kawamura et al., 2011 ; Stohl et al., 2012 ; Draxler 2012）。福島第1原発から放出された放射性物質の環境中への拡散の問題は、今後の環境や健康への影響を判断するための基礎資料として、より定量的な評価が重要になると考えられる。

さらに、東北地方太平洋岸沖の海溝周辺海域は顕著な地震の発生頻度が高く、M7クラス以上の大地震が今後30年以内に発生する確率も高いものと評価されている（地震調査研究推進本部，2012）。30年以内に大地震が発生する確率が無視できない数値であることを踏まえると、仮に近未来の大地震によって福島第1原発の施設が大きな被害を受けるとするならば、大地震による放射性物質の放出による環境汚

染のリスクは依然として高いものと考えられる。このような地震災害の高いリスクおよび放射性物質の半減期が長期であることを考慮すれば、福島第1原発の放射性物質の長期的な管理と除去の問題は極めて重大である。次の大地震により受ける原発施設の被害のリスクや原発施設の被害による放射性物質の環境中への拡散のリスクなどを総合的・包括的な視点で評価する必要があるであろう。したがって、東日本大震災に伴って発生した福島第1原発からの放射性物質の拡散に関する事後解析のみならず、将来の大地震を想定した放射性物質の拡散のリスクについての解析も必要不可欠である。

以上のような観点から、本研究では放射性物質の大気中への拡散を念頭におき、そのための基礎的な情報である局地的な気流について検討をする。大気中の物質拡散の問題を考える際には、発生源からの放出量の的確な把握、発生源近傍（原発施設の建物スケール）での局所的な移動と大気境界層への輸送量の評価、大気境界層の気流による地域規模での移流と拡散の評価、大気境界層から自由大気への地域規模から領域規模（さらには地球規模）での移流と拡散の評価といった点が鍵となる。このような移流と拡散を評価するためには、原発施設の建物スケールから地域規模・領域規模の流れ（風）と乱れ（乱流）を適切に把握しなければならない。このような大気の流れや乱れを把握し評価するためには数値モデルを用いたシミュレーションが有効である。建物スケールの風や乱流の効果は、建物を陽に表現した

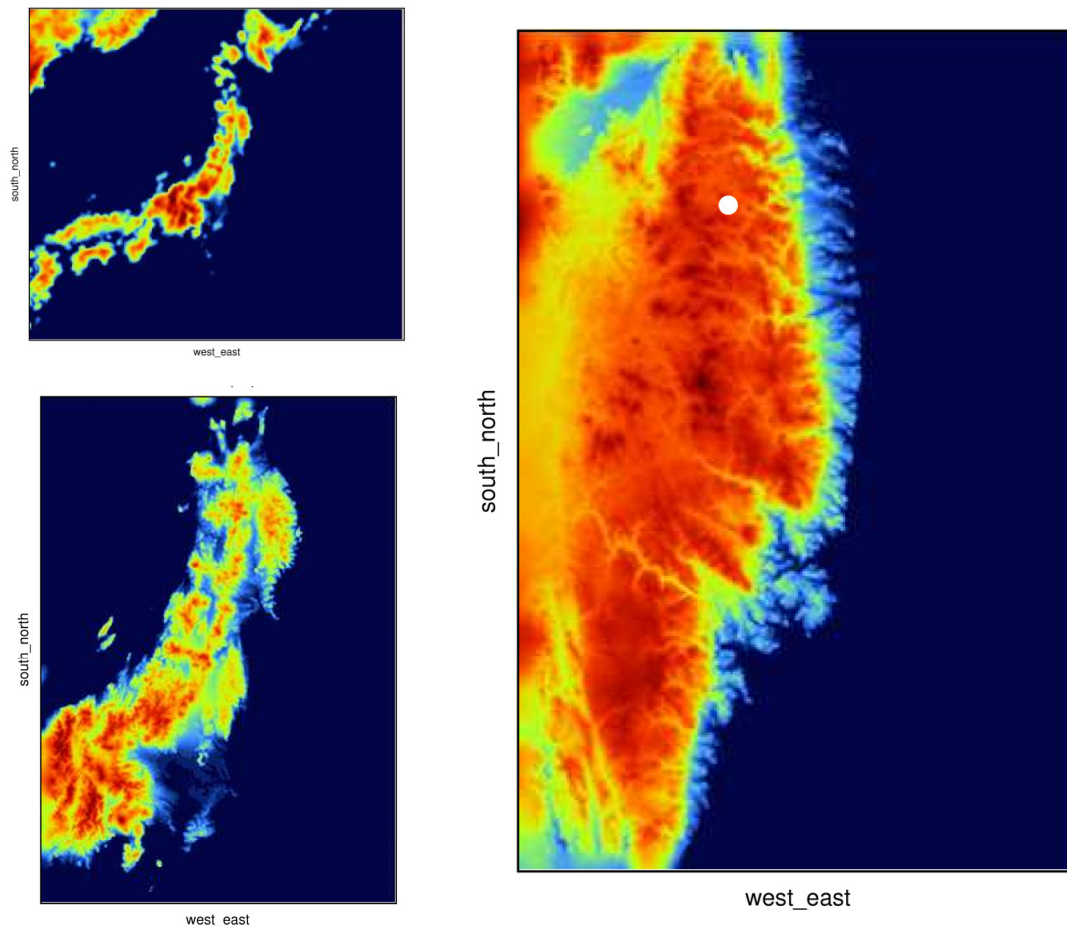


Fig.1 The computational areas with the 10-km grid (Domain1, upper left), the 2-km grid (Domain 2, lower left), and the 400-m grid (Domain 3, right). The color shading indicates the surface elevation scaled by the maximum heights (2253 m for Domain 1, 3200 m for Domain 2, and 1150 m for Domain 3). The white dot in Domain 3 indicates the location of the Iitate AMeDAS observation point.

数値モデルを構築することで評価することができる（例えば、Nakayama et al., 2011 ; Nakayama et al., 2012）。一方、地域規模や領域規模での風や乱流は、高低気圧・台風・前線・降水系といった様々な天候条件や気象擾乱の影響のもとで時空間に激しく変動するため、気象場の影響を含めて数値モデルにおいて的確に表現する必要がある。同時に、現実的な地形を数値モデルにおいて表現する必要がある。これは、風は地上に近いほど地形の影響を強く受けるためである。地形を詳細に数値モデルで表現するためには高い空間分解能が必要であり、それを実現するのが領域気象モデルである。

地上付近の風を気象モデルで再現する上で地形表現が大事であることが最近の研究で強く主張されている（Jimenez et al., 2008 ; Takemi et al., 2010 ; 竹見ら, 2010 ; Jimenez and Dudhia, 2012 ; 竹見, 2012）。台風の通過に伴う強風の再現数値シミュレーションの場合について、地形表現の違いが地上付近の風の

表現に与える影響を調べたところ、同じ空間分解能であってもより精緻に地形を表現した場合のほうが風速の細かい時間変動が表現されることが分かっている（Oku et al., 2010）。特に日本のように国土の大半が急峻かつ複雑な地形によって特徴づけられる場合には、地上近傍から大気境界層での風を数値シミュレーションで再現する上で地形表現の精密さが気象モデルに求められる。福島第1原発が立地する地域の地理的な特徴は、太平洋岸に原発が立地するため東側には海が広がっているものの、その西側には1000 m級の山頂を持つ山々がそびえる阿武隈高地が南北に広がっており、多数の尾根や谷が存在している。日本の原子力発電所の多くは、福島第1原発の立地地域のように、複雑地形上またはその近傍に位置する。したがって、原発施設からの放射性物質の大気拡散を気象モデルにより数値的に解析する場合には、複雑地形の影響を受ける局所的・局地的な気流の時空間変動を可能な限り精度良くモデルで表現す

る必要がある。

本研究では、領域気象モデルを用いて高分解能数値シミュレーションを行うことにより、複雑地形上での気流の局所規模での変動特性を明らかにすることを目的とする。高分解能シミュレーションの結果を低分解能での数値シミュレーションの結果と比較することで、地上付近の風の微細な変動が高分解能化によってどのように表現されるのかについて検討する。本研究では気流に焦点をあてており物質輸送は考慮してはいないものの、本論考の最後に、今後の物質輸送の高分解能数値解析の方向性について議論する。

2. 気象モデルと数値計算の設定

本研究で行う数値シミュレーションに用いた領域気象モデルは、米国国立大気研究センター (NCAR) で開発された Weather Research and Forecasting (WRF) モデルの Advanced Research WRF (ARW) Version 3.1.1 (Skamarock et al., 2008) である。福島県東部を主たる解析領域とした高解像度数値シミュレーションを行うため、ネスティング機能を利用し、総観規模の効果を取り入れつつ主解析領域を細密格子間隔で分解するように計算領域を設定した。ネスティング機能による高分解能化については、降水現象の再現計算において有用性を調べている (竹見, 2010)。

高分解能計算をすることの目的は、地形の微細な起伏をより正確に表現することで気流の微細な変動を再現することにある。3段階のネスト領域を設定し、水平格子間隔を10 km/2 km/400 mと徐々に細密化した。一番外側の第1領域 (Domain 1) は、日本列島のうち北海道・本州・四国・九州の主要4島のほぼ全域を覆う1800 km×1600 kmの領域である。第2領域 (Domain 2) は560 km×800 km, 第3領域 (Domain 3) は100 km×150 kmの領域をカバーする (Fig. 1)。それぞれの計算領域は格子間隔が異なるため、同一地域でも地形表現が大きく異なる。計算領域の上端高度は50 hPaとし、鉛直方向の格子点数は45とし、下層1 kmには14層を配置するように大気下層ほど細密な格子間隔とした。

数値シミュレーションのための初期値・境界値には、気象庁のメソ客観解析値および米国環境予測センター (NCEP) 最終解析値を用いた。ネスト領域間のデータのやりとりは、親領域から子領域への一方向のみとしている (1方向ネスティング)。モデルの地形および土地利用の表現には、第1領域および第2領域にはUS Geological Survey (USGS) 全球30秒値を用い、第3領域には国土地理院数値地図50 mメッシュ値および国土交通省国土数値情報100 mメッシュ値

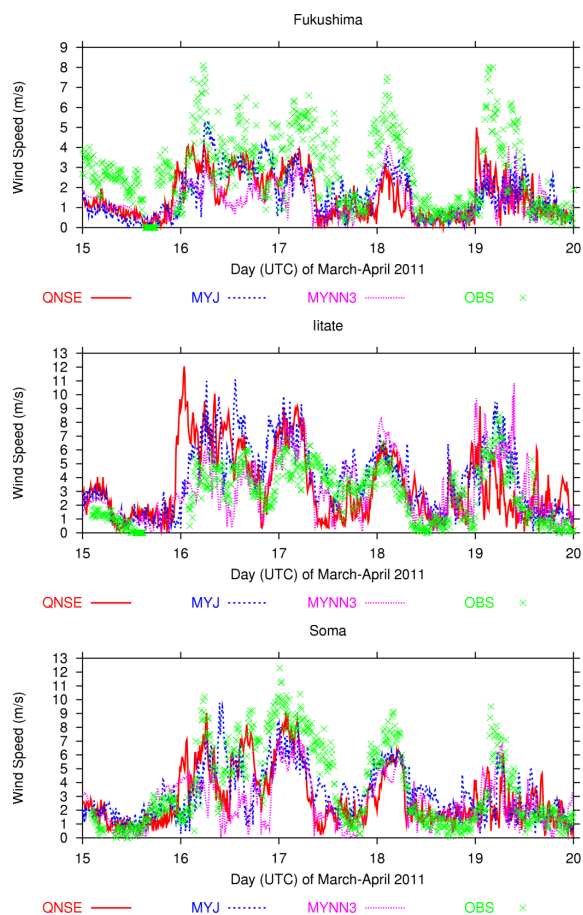


Fig. 2 Time series of surface wind speed from observation (green) and from numerical simulations with the MYJ (blue), the QNSE (red), and the MYNN3 (pink) scheme at Fukushima City (upper), Iitate Town (middle), and Soma City (lower).

を用いた。地形の取り込み方はTakemi (2009) に説明がなされている。

気象の素過程のモデル化としては、雲微物理過程はWSM6スキーム、積雲過程はKain-Fritschスキーム (ただし第1領域のみ)、短波放射・長波放射はそれぞれDudhiaスキーム・RRTMスキーム、陸面過程にはNoahスキームを用いた。これらスキームの詳細はSkamarock et al. (2008) の説明を参照されたい。

本研究では主として地上付近における気流の再現性の検討にある。したがって、境界層乱流過程の取り扱いが重要となる。これまでの我々の経験 (Takemi, 2009; Takemi et al., 2010; 竹見ら, 2010; Oku et al., 2010) から、Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) スキーム (Janjic, 2002) を基本設定とした。このスキームでは乱流運動エネルギーの輸送方程式を解いて乱流粘性係数・乱流拡散係数を決定している。このスキームと同種のものがWRFに用意されており、本研究では、3種類のスキーム (MYJスキーム, Mellor-Yamada

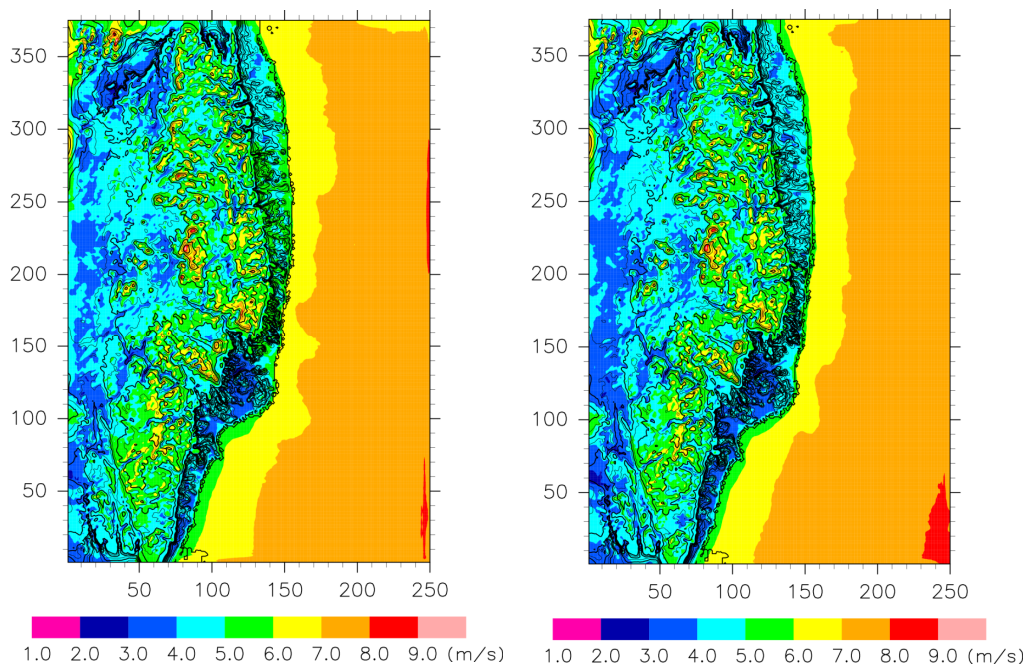


Fig. 3 Spatial distribution of 10-m-level wind speed average in time during the simulated period for the MYJ case (left) and the QNSE case (right) in Domain 3. The solid contour lines indicate the surface elevation.

Nakanishi-Niino Level 3 (MYNN3) スキーム, Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE) スキーム) について検討を行った上で, MYJ スキームを基本とすることとした。スキーム間の違いについては3.1節で述べる。

数値シミュレーションでは, 2011年3月11日0000 UTCから4月1日0000 UTCまでの期間を対象とした。計算結果の出力時間間隔は10分とした。なお, 本研究での時刻はすべてUTC (世界標準時) としている。

3. 計算結果

3.1 地上風の表現と境界層スキーム依存性

最初に, 気象庁の地方官署およびアメダス観測地点における風速の時間変動が高分解能シミュレーションでどのように表現されるのかについて示す。地震後の停電等の影響により, 福島県内の多くの観測地点でデータの欠損が生じた。ここでは, 比較的欠損値の少ない福島・飯館・相馬の3地点の時系列について調べた。Fig. 2は, これら3地点での風速の観測値とモデルによる風速 (地上高10 mに換算) の計算値との時系列を示す。福島での風速については, モデル計算で全般に過小評価されているものの時間変動のパターンはある程度観測結果に一致していることが分かる。一方, 飯館・相馬の両地点での風速については, モデル計算は定量的には不十分ではある

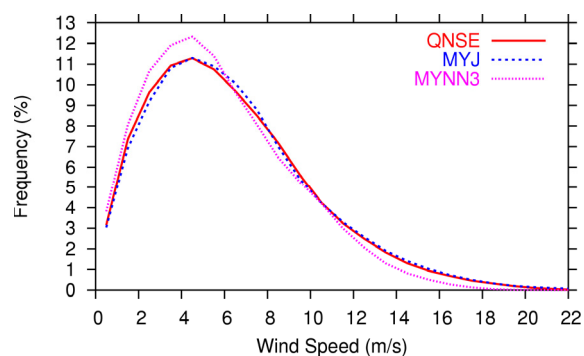


Fig. 4 Frequency distribution of wind speed at the 10-m height above the ground level (AGL) for the QNSE (red), the MYJ (blue), and the MYNN3 (pink) case in Domain 3.

ものの全般的には観測の大局的な時間変動がよく捉えられているものと言える。各境界層スキーム間の違いは明確には見受けられない。

境界層スキームに対する依存性を見るために, Domain 3において各計算格子点別に時間平均 (計算期間の全時間平均) した風速の空間分布をFig. 3に示す。平均風速は, 阿武隈高地での地形の複雑性に起因する微細な分布構造が両スキームの場合に共通して見て取れる。また, 阿武隈高地の東側の沿岸部や西側の盆地部での低風速域の分布の仕方も両スキームで違いは明瞭ではない。このように, 風速の平均的な空間分布特性は, 今回調べた境界層スキームの

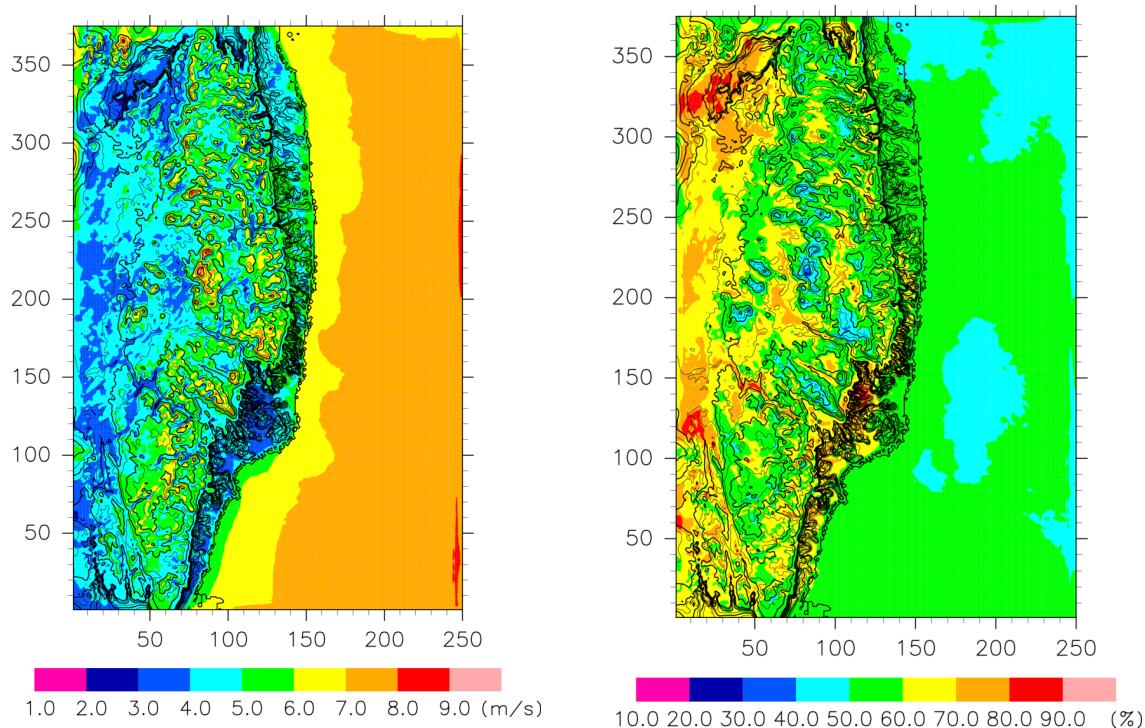


Fig. 5 Spatial distribution of surface wind speed average in time (left) and its standard deviation normalized by the averaged wind speed (right) for the MYJ case in Domain 3. The surface wind here refers to the wind at the 10-m height AGL. The solid contour lines indicate the surface elevation.

範囲内では大きな違いは認められなかった。

Domain 3で計算された地上高10 mでの風速の頻度分布をFig. 4に示す。MYJとQNSEとはほぼ一致した分布となっているのに対し、MYNN3では低風速の頻度が高く評価されていることが分かる。Fig. 2で示した地点別の時系列からは境界層スキームの違いはあまり明瞭には認められないものの、Fig. 4のように計算領域全域かつ計算期間全体で評価すると違いが現れる。このことから、境界層スキームの違いによる風速表現の不確実性には常に留意すべきであることが言える。

3.2 高分解能化による風速表現

次に、400 m分解能のDomain 3での風速の表現性について詳細に調べる。以下に示すのは、基本としたMYJスキームを用いた結果から求めたものである。

Domain 3における地上での風速変動の空間的なパターンを見るために、計算領域の各格子点での風速の時間平均値とその標準偏差（ただし時間平均値で割って規格化した数値）を求めた。Fig. 5は、地上高10 mでの風速について算出した結果を示す。Fig. 1で見たとおり、福島県東部地域の阿武隈高地には東西に横切るように多数の谷筋があり、高地の西部には福島盆地や郡山盆地などの低地が南北に広がっている。このような地形の複雑さを反映して、Fig. 5では、

平均風速は山頂付近・尾根・斜面において強化されている様子や谷筋で弱風域になっている様子、また風速変動については阿武隈高地内の谷筋にあたる地点や福島盆地・郡山盆地などの低地での変動が顕著であることが分かる。このように、地形の微細な起伏に対応した風速分布が高分解能数値シミュレーションによって表現することができる。この結果は、庄内平野での冬季の低気圧に伴う強風事例の再現計算（Takemi et al., 2010）や東京都心部での爆弾低気圧に伴う強風事例の再現計算（竹見ら, 2010）においても見出されたものである。高分解能化によって精緻に地形を表現することの重要性があらためて確認できる。

Fig. 5で見られた傾向は、地上高が高くなっても出現する。地上高50 m, 100 m, 200 m, 500 mの風速について、Fig. 5と同様の分布を調べたところ、地上高200 mまでは風速の平均値や変動幅の空間分布のパターンが地形の複雑性に対応していることが確認できた。地上高が500 mになると、風速分布はもはや地形分布を反映しないようになる。言い換えると、500 m高のように大気境界層の上層になると地形の影響は無視できるようになると言えるのである。

3.3 風速表現の解像度依存性

3.2節では400 m分解能での風速表現について見た。

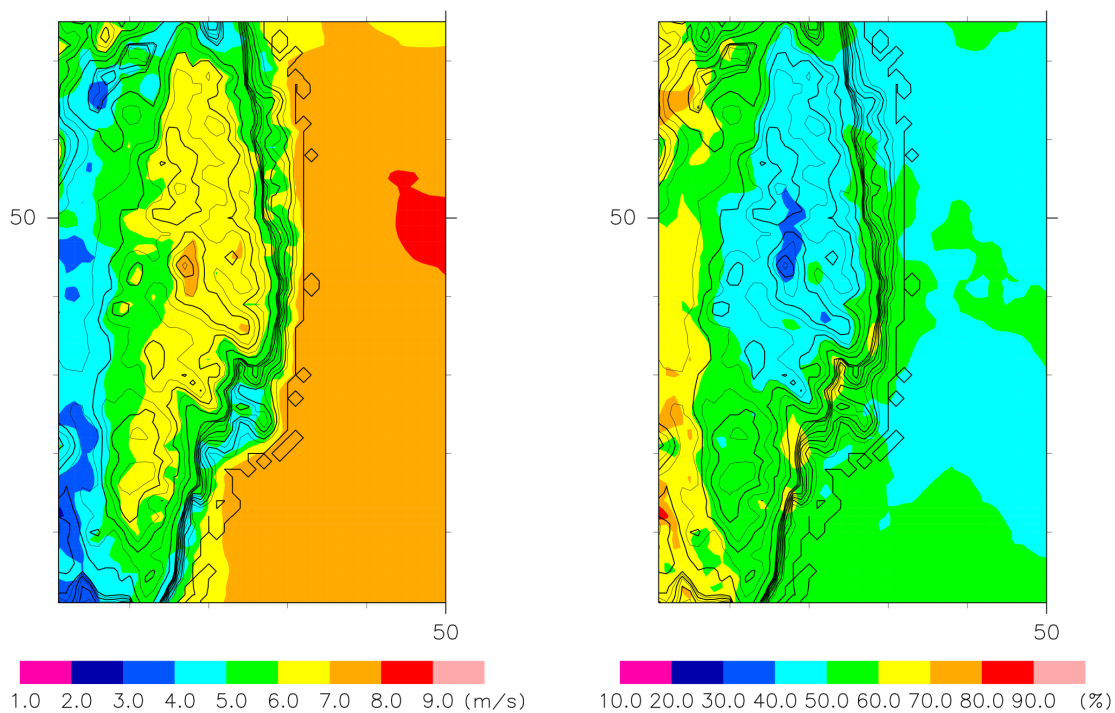


Fig. 6 The same as Fig. 5, except for the case obtained in Domain 2. The area corresponds to the Domain 3 is chosen from the total area of Domain 2.

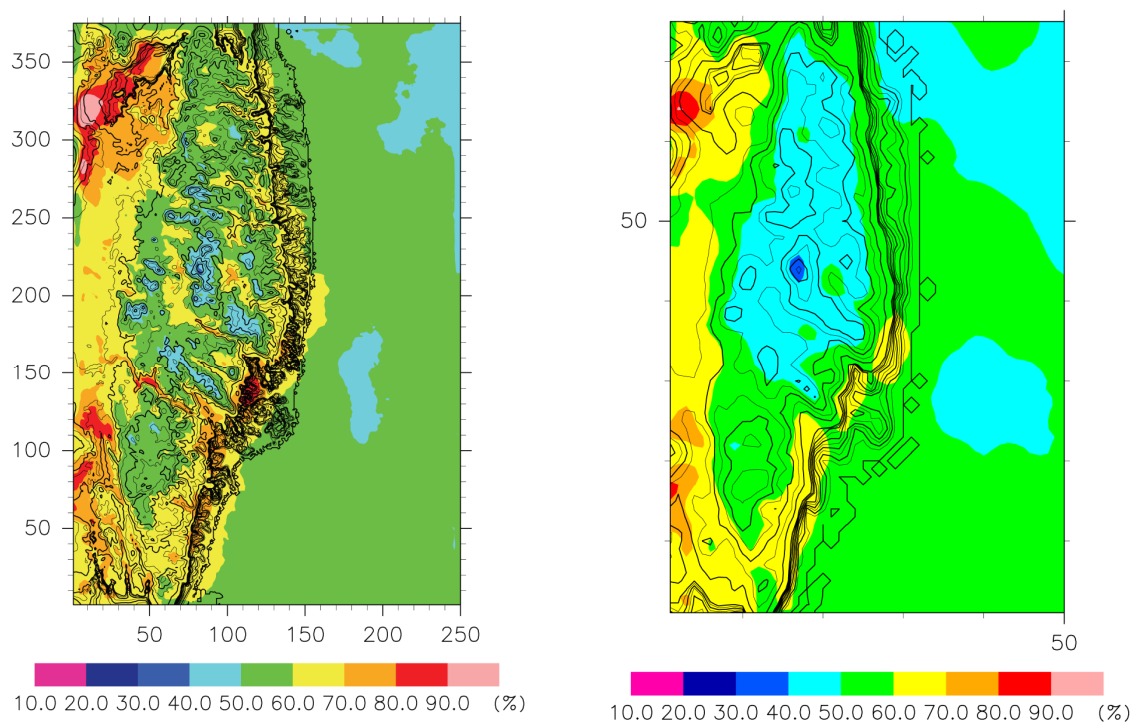


Fig. 7 Spatial distribution of the normalized standard deviation of wind speed at the 100-m AGL for the MYJ case in Domain 3 (left) and Domain 2 (right). The solid contour lines indicate the surface elevation.

本数値シミュレーションでは一方向ネスティングをしているため、Domain 2の結果はDomain 3の結果の影響を受けない。したがって、Domain 2の結果から

低解像度の場合の風速表現を見ることができる。

Fig. 5と同様の格子点別の平均風速と標準偏差の空間分布をFig. 6に示す。Domain 2で得られた結果の

うちDomain 3に相当する領域を切り出して表示している。Fig. 5の微細な分布パターンと比べると、Fig. 6には詳細な風速分布の情報が平均風速・風速変動幅の両面で明らかに消失していることが分かる。2 km格子で表現される地形は、400 m格子の場合と比べてかなり平滑化されて表現されているため、当然ながら地形の微細性に対応した風速分布は2 km格子の場合では表現されるべくもない。

地上高が100 mになった場合の風速の変動幅（標準偏差を平均風速で規格化したもの）をFig. 7に示す。この図では、Domain 2とDomain 3の結果を並列して示すことにより、解像度の違いによる風速表現の違いを比較する。高分解能の場合（Fig. 7左）にはFig. 5の右図と同様の微細な空間パターンが確認できるが、一方、低分解能の場合（Fig. 7右）にはFig. 6の右図のような平滑化された分布パターンしか得られないことが分かる。このように、地上高が100 mに上がったとしても、異なる分解能による地形表現の違いが及ぼす風速値への影響は消失することはないのである。この傾向は地上高200 mでも確認された。したがって、大気境界層の下層から中層の高度に至るまで、風速の再現において地形表現が重要であることを認識することができる。

地点別の地上風速の時間変化の解像度依存性を見るため、Domain 2およびDomain 3で得られた結果を比較した（竹見と石川，2012）。飯舘地点での風速時系列を比較したところ、高分解能の場合に比べて低分解能の場合には風速変動がゆるやかで変動の幅も大きくなく、低分解能での風速変動は高分解能の変動を平滑化したようなパターンであった。高分解能の場合には、風速の変動幅が大きくピークの値もより顕著になっている。一般に、危険物質の大気拡散を考える際には、平均量ではなくピーク値の情報が人体影響の点で必須である。したがって、短時間での物質輸送を考える際には高分解能計算が必要不可欠であると言える。

4. まとめ

本研究では、領域気象モデルの水平格子間隔を400 mとして高分解能で地形を詳細に表現することにより、東日本大震災発生日から21日間の福島県東部地域での局地的な気流を再現する数値シミュレーションを行った。本数値シミュレーションの意図は、福島第1原発からの放射性物質の大気中の輸送を考える上で基本情報となる局所的な気流の性状を把握し、高分解能計算による複雑地形上での風速の表現性や再現性を検討することにある。領域気象モデルとしてWRFモデルを用いた。境界層スキームを変更した

感度実験を行った上で、数値シミュレーションにおいて基本とする境界層スキームを決め、特に地上付近から境界層内の風の表現性について検討した。対象領域には1000 m級の山がそびえる阿武隈高地があり、高地内には多数の谷筋や尾根が存在している。

高分解能数値シミュレーションにより、対象地域の複雑地形の特徴を反映した風速の時空間変動のパターンを表現することができた。地形の微細構造に対応した詳細な風速の分布特性を数値シミュレーションで表現することができた。

1節で言及した通り、今後は、2011年3月11日の東日本大震災直後の福島第1原発からの放射性物質輸送の事後解析だけでなく、今後数10年以内に発生が懸念される東北地方太平洋岸沖合の顕著地震の影響を評価する必要がある。すなわち、次の大地震で福島第1原発が甚大な被害を受け、放射性物質が再び放出されてしまう最悪の事態を想定し、原発施設の建物スケールからその周辺の地域規模へ、地域規模から福島県や周辺の東北地方や関東地方の領域規模へ、さらには領域規模から地球規模への環境汚染のリスクを評価することである。放射性物質のような人体に影響を及ぼす危険物質については、積算値のみならず瞬間的なピーク値を把握することが重要である。瞬間的な変動を数値モデルによって把握し予測するためには、大気中の乱流をできるだけ精度良く表現することが大事である。このため、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）と呼ばれる乱流計算手法を予測計算に用いることが強く望まれる。

しかしながら、LESは微細規模の乱流を陽に解くために計算コストが高く、現時点で予測計算に用いるのは現実的な選択ではない。とは言え、計算機の演算能力の発展は目覚ましいものがあり、現在世界最速である理化学研究所の「京」のようなスーパーコンピュータは10年もすればかなり身近な存在になるものと推測される。よって、LESが予測計算に用いられる日はそう遠くはない。

したがって、現在できることは、近い将来に可能となるであろうLESによる予測計算のための基盤計算技術の開発と確立である。例えば、建物スケールから地域規模まではLESで行い、それ以上のスケールでは領域気象モデルを用い、気象モデルとLESモデルとを結合させた計算手法は有望であると考えられる。我々は、竹見と中山（2009）で述べた通り、この点を強調してきた。気象モデルとLESモデルの結合による複雑地表面上での乱流変動の数値解析は、その初期的なアプローチがTakemi et al.（2006）により提案されている。また、耐風設計のための手法の一環として気象モデルとLESモデルを併用した解析手法の提案がなされている（内田ら，2010）。さらに、

Nakayama et al. (2012) は、都市域を対象として複雑地表面上での大気乱流の数値解析のため、気象モデルからLESモデルに初期条件・境界条件として接続する新しい手法を提案した。これにより、実際の気象場の影響と都市の建物に起因する乱流との双方を考慮することが可能となる。今後は、このNakayama et al. (2012) の手法をさらに改良して発展させ、気象モデルとLESモデルの両者を効果的に結合させる計算手法として確立させ、物質拡散の問題に適用することが望まれる。

将来の大地震によって最悪の事態が発生した場合を想定し、様々なアプローチで放射性物質の環境中への拡散の問題に取り組むことが学術コミュニティに求められている。そしてこの取り組みは、一時的なものであってはならず、継続的かつ長期的な努力としてなされるべきである。

謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所「平成23年度東日本大震災に関する緊急調査」の一環として実施されたものです。

参考文献

- 内田孝紀, 丸山敬, 竹見哲也, 奥勇一郎, 大屋裕二, 李貫行 (2010) : 気象モデルと流体力学モデルを用いた風車設置地点における設計風速評価手法の提案, 風力エネルギー協会誌, Vol. 34, pp. 118-124.
- 地震調査研究推進本部 (2012) : 長期評価, http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02.htm. (2012年6月7日閲覧)
- 竹見哲也 (2012) : 気象擾乱に伴う突風災害の数値シミュレーション, 計算工学, Vol. 17, pp. 16-19.
- 竹見哲也, 石川裕彦 (2012) : 2011年3月の福島県東部地域における風速特性・拡散特性のモデル解析, 「2011年度秋季大会スペシャルセッション『放射性物質輸送モデルの現状と課題』報告」, 天気, Vol. 59, pp. 243-244.
- 竹見哲也 (2010) : 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, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, pp. 337-343.
- 竹見哲也, 辰己賢一, 石川裕彦 (2010) : 高分解能領域気象モデルによる気象擾乱に伴う風速の極値の解析, 風工学シンポジウム論文集, 第21巻, pp. 19-24.
- 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, pp. 13-20.
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., and Yamazawa, H. (2011) Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere, J. Nuclear Sci. Tech., Vol. 48, pp. 1129-1134.
- Draxler, R. R., and Rolph, G. D. (2012): Evaluation of the Transfer Coefficient Matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima, J. Geophys. Res., Vol. 117, D05107, doi:10.1029/2011JD017205.
- Janjic, Z. I. (2002): Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, Vol. 437, 61 pp.
- Jimenez, P. A., Gonzalez-Rouco, J. F., Montavez, J. P., Navarro, J., Garcia-Bustamante, E., and Valero, F. (2008): Surface wind regionalization in complex terrain, J. Appl. Meteor. Climatol., Vol. 47, pp. 308-325.
- Jimenez, P. A., and Dudhia, J. (2012): Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model, J. Appl. Meteor. Climatol., Vol. 51, pp. 300-316.
- Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S., Awaji, T. (2011): Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ¹³¹I and ¹³⁷Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster, J. Nuclear Sci. Tech., Vol. 48, pp. 1349-1356.
- Morino, Y., Ohara, T., and Nishizawa, T. (2011): Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011, Geophys. Res. Lett., Vol. 38, L00G11.
- 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), Hydrol. Res. Lett., Vol. 4, pp. 1-5.
- Nakayama, H., Takemi, T., and Nagai, H. (2011): LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries, J. Appl. Meteor. Climatol., Vol. 50, pp. 1692-1712.
- Nakayama, H., Takemi, T., and Nagai, H. (2012): Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations, Atmos. Sci. Lett., Vol. 13, doi: 10.1002/asl.377.

- Skamarock, W., 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, 113 pp.
- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., and Yasunari, T. J. (2012): Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 12, pp. 2313-2343.
- 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.
- Takemi, T. (2009): High-resolution numerical simulations of surface wind variability by resolving small-scale terrain features. *Theoretical Applied Mechanics Japan*, Vol. 57, pp. 421-428.
- Takemi, T., Tamura, T., Takei, Y., and Okuda, Y. (2006): Microscale analysis of severe winds within the urban canopy during a period of explosive cyclogenesis by coupling large-eddy simulation and mesoscale meteorological models, *The 4th Int'l Symp. Comp. Wind Eng.*, Yokohama, Kanagawa, Japan, 16-19 July 2006, *Journal of Wind Engineering, Japan Association for Wind Engineering*, Vol. 31, No.3, pp. 165-168.
- Takemura, T., Nakamura, H., Takigawa, M., Kondo, H., Satomura, T., Miyasaka, T., and Nakajima, T. (2011): A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *SOLA*, Vol. 7, pp. 101-104.
- Yasunari, T., Stohl, A., Hayano, R. S., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., and Yasunari, T. (2011): Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident, *Proc. Nat'l. Acad. Sci.*, Vol. 108, pp. 19530-19534.

(論文受理日：2012年6月7日)

High-Resolution Meteorological Modeling of Local-Scale Wind Fields over Eastern Fukushima in March 2011

Tetsuya TAKEMI

Synopsis

This study investigated the spatial and temporal changes of local-scale winds over the complex terrain of Fukushima Prefecture in March 2011 by conducting high-resolution numerical simulations with a regional meteorological model. The analyses were intended to gain insights into the airflows relevant to the dispersion of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant that was damaged by the great Tohoku earthquake on 11 March 2011. Micro-scale characteristics and local peaks of surface winds due to the micro-scale structures of the terrain were clearly represented by the high-resolution simulations at the 400-m horizontal grid spacing. The effects of the terrain on the variability of winds were identified not only near the surface level but also at the levels of up to the 200-m height above the ground level. A high resolution that is adequate to represent complex terrain features is indispensable for analyzing the spatial and temporal variability of winds near the surface and in the lower part of the atmospheric boundary layer.

Keywords: local circulation, atmospheric boundary-layer flow, topography, regional meteorological model, Fukushima Daiichi nuclear power plant