

局地的気象現象の面的推定手法

福原 隆彰* 宍戸 真也*

Methods to Estimate Spatial Distribution of the Local Meteorological Conditions

Takaaki FUKUHARA Masaya SHISHIDO

In order to estimate meteorological conditions on the time-scale and spatial-scale enough to prevent the meteorological disasters of the railroad by interpolating data observed by anemometers or rain gauges and, we estimated meteorological conditions by using numerical simulations. We compared the results of the numerical simulation to the observed data in the case of strong wind, heavy rainfall, and heavy snowfall. As a result, although there were cases where meteorological conditions were underestimated by numerical simulations, but it was possible to reproduce a meteorological phenomenon qualitatively.

キーワード：数値シミュレーション，気象，災害

1. はじめに

強風，大雨，大雪による鉄道の気象災害を未然に防ぐための措置の一つとして，風速計や雨量計などの気象観測機器が鉄道沿線に設置され，強風や大雨などの監視が行われている。これらの気象観測機器は数 km ～数十 km ごとに設置されているため，得られるデータはいわゆる「点のデータ」である。しかしながら，鉄道の気象災害をもたらす気象現象は積乱雲や台風，低気圧などがあり，それぞれの現象で特有の時間，空間的な広がりがある（図 1）。これらの気象現象は風の吹き方，雨や雪の降り方に分布があるため，これらが鉄道にもたらす被害が気象観測機器の設置箇所やその付近で発生するとは限らない。また，局地的大雨などといった，鉄道沿線の風速計や雨量計の配置間隔より小さい気象現象については必ずしもこれを観測できるとは限らない。加えて，降

雨による災害は線路近接（用地内）の雨量のみならず，河川の増水など，用地外での大雨に起因する災害が発生することもある。

そのため，風速計や雨量計などの「点」のデータに加え，「面」的に風向風速や降水量などを得ることで，鉄道に被害をもたらす気象現象をよりの確に把握できるようになる。

面的に得られる気象データには気象レーダーや国土交通省の解析雨量，XRAIN（国土交通省 X バンド MP レーダーネットワーク），気象庁の GPV データ（格子点値：地球を規則正しく並んだ格子で覆ったときの各格子での値）などがあり，年々容易に入手できるようになってきた。しかしながら，水平分解能（データの水平方向の間隔）が 250m で細かく雨の状況を知ることができる XRAIN のデータは，全国を網羅していないため利用できる地域に制限がある。また，気象レーダーや解析雨量など全国を網羅している面的な気象データは，空間分解能が最も細かいもので雨量が 1km，風速などが 2～5km となっており，また，時間分解能（時間間隔）も最も細かいもので雨量が 5 分または 30 分毎，風速が 1～3 時間毎となっている。鉄道の運転規制区間は概ね数 km ～十数 km 単位で設定され，また運転規制の発令は規制値に達した任意の時刻に行われているため，これらのデータのみでは鉄道沿線の防災に活用し得る分解能で面的に捉えられない場合も考えられる。

また，これらの面的な気象データについて，上に述べた時間間隔・空間間隔のデータが整備されているのはここ数年のことである。規制値の設定には過去の被災事例に基づく検討が必要であるが，過去に発生した鉄道の災害時の気象状況についてはこの分解能での面的な気象情

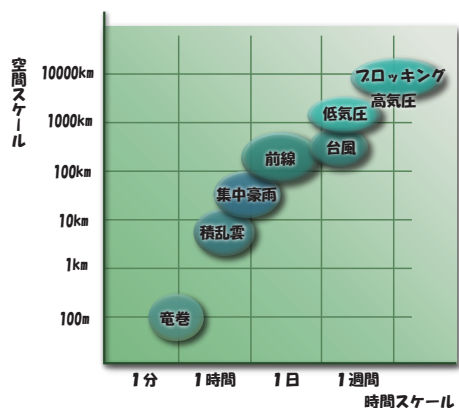


図 1 気象現象の空間・時間的な広がり¹⁾

* 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：防災技術

報はなく、どの程度の風速、雨量、積雪で災害が発生したのかを推定することは難しい。

気象現象を面的に把握するこの他の方法として、気象モデルを用いた数値シミュレーションによるものがある。これは、対象とする領域を細かな点（格子点）で区切り、各格子点について大気や熱に関する方程式をコンピュータで解いて、対象とする地域の気象状況を把握するものであり、日々の天気予報を作成する際にも用いられている。気象の数値シミュレーションでは過去に発生した強風や大雨、大雪などの気象現象の計算も行うことができるため、過去に発生した災害において、災害発生時の気象状況も面的に把握することが可能である。

鉄道総研では過去に鉄道沿線の強風箇所を把握することを目的として、気象モデルおよび流体モデルといった数値シミュレーション手法と地形因子解析手法を用いた強風箇所抽出方法を開発した^{2) 3)}が、この方法は強風のみを対象としていた。

そこで、大雨や大雪も対象とし、気象の数値シミュレーションモデルを用いて、鉄道の災害をもたらす自然現象である強風、大雨、大雪事象を再現する数値計算を行い、現地気象観測の結果と比較することで気象現象の再現性を評価した。

2. 数値シミュレーションを用いた面的な気象状況の数値計算

気象の数値シミュレーション（以下、数値計算）では対象とする気象現象や分解能、計算対象とする時間などにより様々な種類の気象モデルが開発され、使い分けられている。そのため、気象現象の数値計算では、まず求める気象現象と水平分解能（格子点間隔）を決めたいうで、使用するモデルを選定する。次に、そのモデルに対応した初期条件（計算開始時におけるモデル内の大気の状態）と境界条件（計算領域の境界での気象条件）などの諸条件を設定し、計算を行う。今回の計算に使用したモデルおよび設定を以下に述べる。

2.1 使用モデルの選定

鉄道の気象災害をもたらすような強風、大雨、大雪が鉄道沿線でどのように発生したかを細かい分解能で面的に把握するため、過去に発生した災害の空間的な大きさをもとに、水平方向の格子点間隔を250mとしてこれらの気象現象を面的に求めることとした。

そこで、今回は使用するモデルとして気象の研究や日々の天気予報で使われているモデルの中から、この空間分解能で数値計算ができ、かつ広く使われているモデルの一つであるWRF（Weather Research and Forecasting⁴⁾）を選定した。WRFモデルは現時点で最も多くの

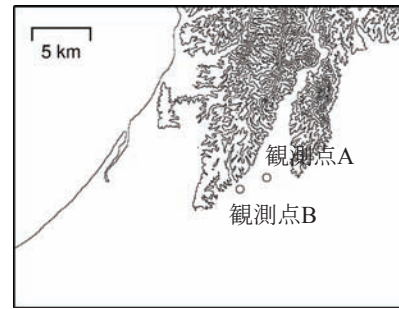


図2 計算対象領域と地形（北海道石狩地域）
（等高線は50m間隔、観測点A、Bは後述）

気象研究者が使っていること、ユーザー側でさまざまな計算条件を入力できるといった拡張性があること、モデルを使用する際の自由度が大きいことなどの特徴がある。

2.2 数値計算における設定

先に述べたように、気象モデルによる数値計算では計算の前に①計算対象領域と格子点間隔やモデル内での計算時間間隔の設定、②初期・境界条件の作成、③各種物理過程（積雲、太陽や地球の放射、大気と地面との熱や水蒸気のやりとりを式で表したもの、他）の選定、の3点を行う。以下に今回の計算で設定した条件を示す。

計算対象領域は強風、大雨、大雪の各現象がともに発生する可能性が高い箇所として北海道の石狩平野を選定し、東西35km、南北27kmの領域を設定した。設定した計算領域について、あわせて行った現地気象観測地点とともに図2に示す。東西、南北方向には250m間隔で数値計算を行うため、計算格子数は東西方向141、南北方向109である。また、鉛直方向の格子数は35とした。

ここで、後述する初期・境界条件の作成に用いる気象データの空間間隔と比べ、今回の数値計算の250mの格子点間隔は小さいため、最初からこの格子点間隔で数値計算をしようとする、初期・境界条件がうまく作成できないため、計算により得られた結果が妥当でないことが考えられる。そこで、より粗い格子点間隔や広い領域で計算し段階的に格子点間隔を小さくするネスティング（最初に広い領域を大きな格子点間隔で計算し、次に計算する領域を絞り、格子点間隔を3分の1～5分の1として計算すること）と呼ばれる手法を用いて最終的に250m格子点間隔での計算を行った。ネスティングは格子点間隔を9km (D1)、3km (D2)、1km (D3)、250m (D4)の4段階とした。各計算領域の位置を図3に示す。

数値計算の対象とした時間は、各事例をもたらした気象擾乱の通過や発達、衰退する時間帯とその前後の時間帯を包括するよう36時間～48時間と設定し、時間間隔は設定した格子点間隔で計算できる45秒 (D1)～0.5秒 (D4)で設定した。計算領域の大きさ、格子点間隔、および計算の時間間隔を表1に示す。

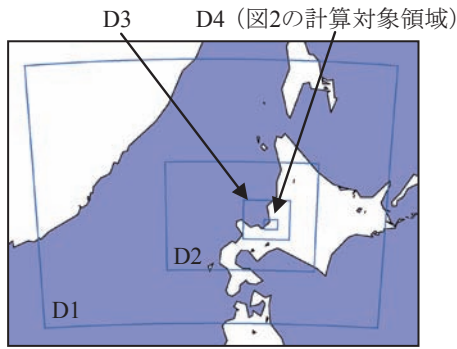


図3 計算領域 D1～D4 の位置

表1 各計算領域の範囲，格子点間隔，計算時間間隔

| | D1 | D2 | D3 | D4 |
|-------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| 格子点間隔 | 9km | 3km | 1km | 250m |
| 計算領域 | 900km × 720km | 390km × 300km | 120km × 108km | 35km × 27km |
| 時間間隔 | 45 秒 | 15 秒 | 3 秒 | 0.5 秒 |

次に，計算開始時に入力する初期条件と，計算領域の境界部分の気象状況を設定する境界条件を作成する必要がある。WRF モデルでは風，温度，湿度などの大気の状態および地面（海面）の温度，土の水分など地表面の状態をそれぞれに設定する。初期・境界条件の作成には気象庁など国内外の気象機関が作成する前述の GPV データが用いられることが多く，本計算ではそのデータとして気象庁の GSM（日本域）領域客観解析データを用いた。このデータは気温，風，相対湿度などが水平方向に 20km 間隔で収録されている。ただし，このデータセットは大気の状態のみが収録され，地表面の温度や海面水温などの地表面のデータが一部不足しているため，アメリカの気象機関が作成したデータ（NCEP-fnl）をあわせて用いた。このデータは緯度経度方向に 1 度（約 110km）間隔で収録されている。

また，上にも述べた物理過程については WRF モデルを用いた高解像度（格子点間隔 300m 程度）の計算事例⁵⁾などで使用実績のある物理過程を用いることとし，強風事例については，境界層（地面に近い高さの領域）での風の流れを精度よく再現できる過程を用いた。

3. 気象の数値計算の結果と観測結果との比較

3.1 強風事例

強風は主に台風，寒冷前線の通過，冬型の気圧配置，小低気圧の通過によりもたらされる。このうち，計算対象とした領域は主に冬型の気圧配置の時に強風となる地域である。ここでは強風事例として，風速の急激な増加が生じていた事例について数値計算を行った。

まず，計算領域の東側にある観測点 A（図2 参照）に

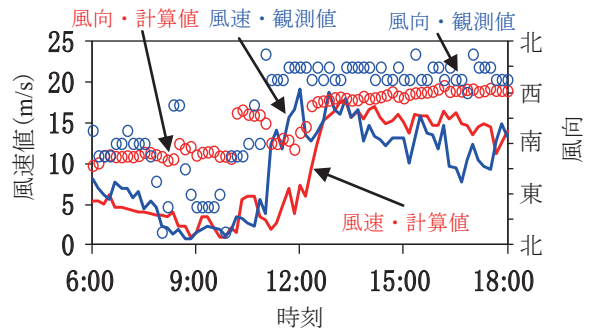


図4 強風事例における地点 A での風向風速の時間変化の比較（観測結果と計算結果）

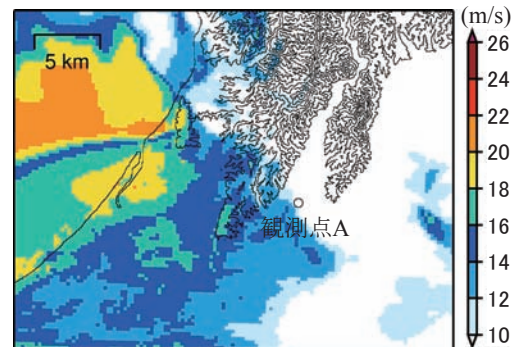


図5 計算による風速の面的分布（12月23日 12:30）

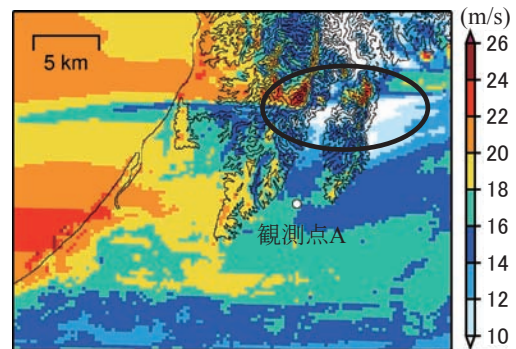


図6 計算による風速の面的分布（12月23日 13:00）

ついて，この観測点に最も近い格子点での地上 10m の水平方向の風速（東西方向の風速と南北方向の風速の合成値）を 10 分毎に求め，この格子点での風速値の時系列を作成した。この時系列と現地観測で得られた風速値について，その時間変化を図4 に示す。

この図より，対象とした事例では風速の急激な増加が始まった時刻が観測より 1～2 時間程度遅れたものの，風速のピーク値は観測結果とほぼ同じ値となったことがわかる。また，風向は 16 方位でみたときに 1～2 方位分ずれていたものの，南よりの風から西よりの風になる現象は本計算により再現することができた。

次に，この事例について風速値の面的な分布を求めた結果を示す。鉄道の運転規制では風速のみを観測する風速計が多く用いられていることから，ここでは風向は考

特集：防災技術

慮せず、風速の絶対値（スカラー量）の分布を示す。

計算で急激な風速増加がみられた 12 時 30 分とその 30 分後となる 13 時での風速の面的な分布を図 5 と図 6 に示す。これらの図をみると、12 時 30 分では風速値が 10m/s 以上となる領域が計算領域の西半分となっているが、13 時ではこの箇所が計算領域の全体に広がっている。従って、風が強くなる領域は時間とともに西側から東側に移動しており、まず海岸線付近で強風が吹き始め、その後観測点 A 付近で吹くようになることがわかる。加えて、領域の北側（図 6 の黒楕円）をみると、丘陵の頂上付近では 25m/s 以上の風速値となっているが、丘陵の間にある沢や丘陵の東側にある平地では 10m/s 未満となっていた。このことから、この事例では丘陵の風下側で山裾に近い箇所では風が弱まる傾向にあった。このような傾向は地上に設置されている風速計だけでは、その配置間隔によっては必ずしも的確に捉えられないものである。

3.2 大雨事例

大雨をもたらす気象現象には台風や梅雨前線などがある。計算対象とした地域においても、これらの気象現象によると考えられる大雨事例が観測された。ここではこの地域で大雨注意報が発表されるような大雨⁶⁾である 1 時間降水量（時雨量）が 30mm 以上となった事例について数値計算を行った結果を示す。

計算領域の東側にある観測点 A と中央付近にある観測点 B について、各観測点に最も近い格子点での前 1 時間降水量を 10 分毎に求め、その時間変化を観測結果とあわせて図 7 に示す。この図より、観測点 B の近傍の格子点では観測で得られた 1 時間降水量より計算結果が小さい値となったものの、観測網の東側にある観測点 A の近傍の格子点では観測でみられた 1 時間降水量の時間変化およびピーク値を概ね再現することができた。ただし、両観測点ともに 1 時間降水量が最も大きくなる時刻は観測結果が 9 時、計算結果が 7 時と、2 時間のずれがみられた。

次に、雨量の面的な分布を比較した。計算結果での 1 時間降水量がピークとなった 7 時と、観測結果でのピークとなった 9 時における、1 時間降水量の計算結果をそれぞれ面的に示したのが図 8 と図 9 である。これらの図をみると、計算結果では 7 時に領域の東側で 20mm 以上の降水が観測されているが、9 時にはほぼ雨が止む結果となった。

次に、計算結果と国土交通省の解析雨量との比較を行った。なお、図 7 にも示したように、1 時間降水量のピークとなった時刻が計算結果では 7 時、観測結果では 9 時となっていたことから、計算より得られた 7 時での 1 時間降水量（図 8）と、9 時での解析雨量（図 10）とを比較した。この結果、降水量の絶対値は領域の全体で過小評価されており、かつ計算により得られた降水領域は観測でのそ

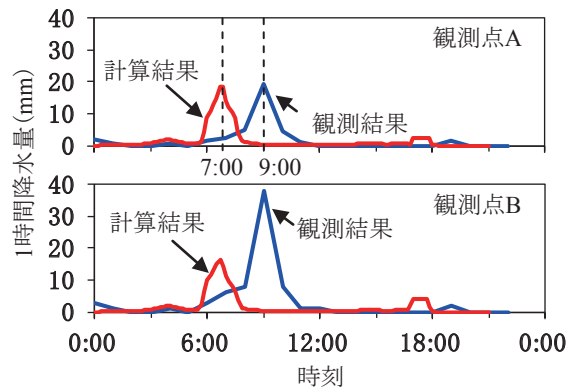


図 7 大雨事例における 1 時間降水量の観測結果と計算結果との比較

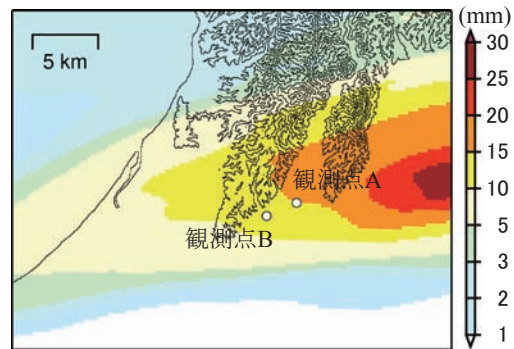


図 8 計算による 1 時間降水量の面的分布（7 月 14 日 07:00）

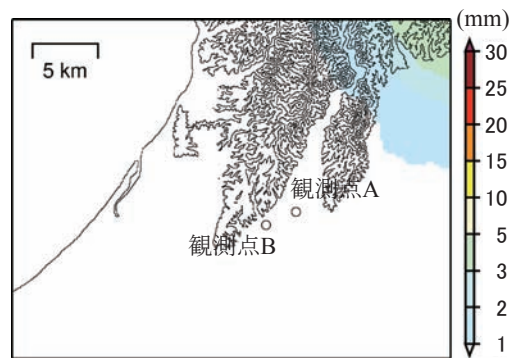


図 9 計算による 1 時間降水量の面的分布（7 月 14 日 09:00）

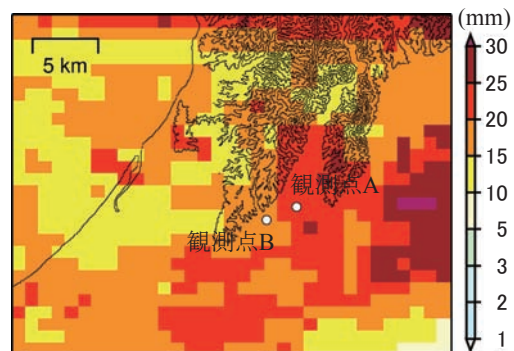


図 10 解析雨量（1 時間降水量）の面的分布（7 月 14 日 09:00）

れより狭かったものの、この領域内では東側の降水量が多くなっている傾向は数値計算でも再現できた。

3.3 大雪事例

大雪をもたらす気象条件の一つに強い寒気を伴って冬型の気圧配置が強まったときがある。計算の対象とした領域でもこのような気象状況となったときに降雪強度が大きくなった事例が観測された。そのうち、この地域において大雪警報や大雪注意報が発表される（12時間降雪が50cm以上で大雪警報が、30cm以上で大雪注意報が発表される⁶⁾）程度の大雪が発生していた事例について、計算を行った結果を示す。

観測点 A に最も近い格子点について、1時間の積雪深の変化量を1時間毎に求め、その時間変化を観測結果とあわせて図11に示す。この図より1時間での積雪深の変化量は現地観測では4cm～7cmであったが、数値計算結果では観測点 A では最大で2cm程度であり、現象をよく再現できたとはいえなかった。大雨事例と同様、降雪域がずれている可能性が考えられたため、この日の12時から24時までの12時間の積雪深変化量を各格子点で計算した結果を図12に示す。この図より、12時間の積雪深変化量は多いところでも10cm未満であり、観測で得られた30cm以上の積雪深の変化は計算されなかった。

冬型の気圧配置で大雪となるとときには大陸の高気圧と海上の低気圧との距離が大きくなること、また、風が日本海を流れるときに空気に水蒸気を供給するが、この効果を十分に考慮出来なかったことがその原因の一つと考えられる。このため、水蒸気の影響を適切に計算することで精度向上が図られると考えられる。

また、積雪深の増減は降雪に加え地上付近の風により運ばれることによる効果もあるが、この効果は今回WRFモデルで設定した格子点間隔よりも細かい地形や風の効果によるものも大きい。そのため、数値計算の結果では、観測で得られた積雪深の増加を精度よく再現できなかったと考えられる。これはWRFモデルでは再現できない細かさで風の流れや地形を考慮する必要があることから、流体モデル等、より細かな格子点間隔で計算できるモデルでの数値計算を行いこの効果を見積もることが、今後取り組むべき課題の一つである。

以上、3.1節以降で述べた結果から、250mと細かい格子点間隔で気象の数値計算を行った結果、今回対象とした事例のうち大雪現象は再現できたとはいえなかったが、強風や大雨をもたらす気象現象についてはその発現する時刻や場所のずれがあるものの、風速値の急激な増加や短時間の降雨など、対象とした気象現象自体は定性的には再現できることがわかった。そのため、対象とした気象現象自体における風速や降水量の空間分布は数値計算で求めたそれらの値と同等であると考えられる。

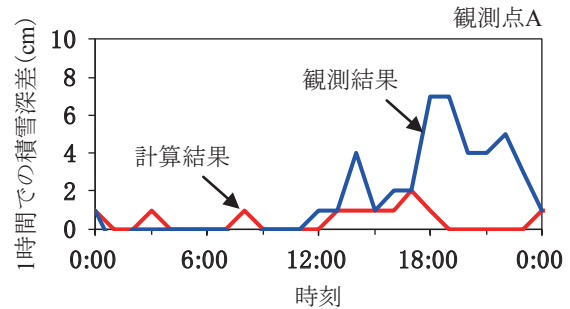


図11 大雪事例における1時間の積雪深変化量
観測結果と計算結果との比較

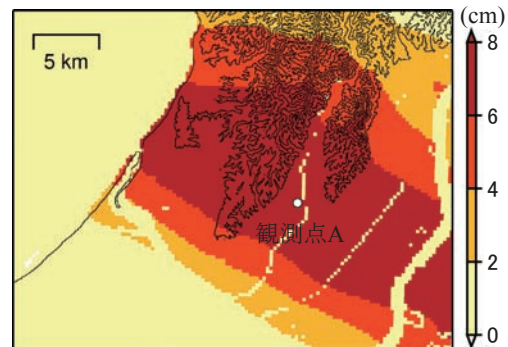


図12 計算による12時間の積雪深変化量の面的分布
(1月8日12:00～24:00)

従って、強風や大雨をもたらした気象現象がどのような構造であるか、また、強風や大雨が発生する前にはどのような気象条件であったかを概ね把握することは可能である。その結果を用いることで、今後同様の気象状況となった場合に強風や大雨などが発生する可能性があるかを見積もることが可能となる。

4. 計算精度向上の検討

今回数値計算をした強風、大雨、大雪事象のうち、大雪事象については再現できたとはいえない結果となった。この再現精度を向上させる方法の一つに、地上観測等で得られた観測データをモデルに組み込む方法がある。

この方法を用いた数値計算の精度向上については様々な研究が行われており、地上や上空の様々な観測データをモデルの初期・境界条件に組み込んで再現精度が向上した例が示されている。しかしながら、これらのデータのうち上空のデータは公表されているものが少ない。その一方で地上のデータは鉄道事業者が雨量や風速を自ら観測していること、他の機関のデータについても地上気象観測点での観測結果は広く公表されていることから比較的容易に入手可能である。

そこで、今回は地上での観測データのみを組み込んだ場合の精度向上の程度を把握するために、この地域で行った地上気象観測で得られた気温や風速の観測データ

特集：防災技術

を初期条件に組み込んだ数値計算を行い、観測データを組み込まずに計算した場合との差を比較した。

観測データの組み込みには WRF モデルに最適化されたツールの WRFDA を用いた。観測データの組み込みの有無による計算結果の違いを比較する事例は 3.3 節で述べた大雪事例とした。今回の計算領域では観測点 A と B を含め 5 地点の現地観測で気温・風向風速・積雪量などを観測していたこと、また、計算領域内に気象庁アメダスが 2 地点あることから、計 7 地点の気温および風向風速の観測データをモデルに組み込んだ。

この処理を施した初期・境界条件を用いて、同様の計算条件で数値計算を行い、積雪深の時間変化を調べた。その結果を図 13 に示す。図 12 と図 13 を比較すると、地上観測データを組み込むことで領域全体でみると積雪深変化量はわずかながら増加したものの、その値は 10cm 未満であり観測値とは大きな隔たりがあった。このことから、数地点での風や気温等の地上観測データだけでは計算精度の向上には十分ではないことがわかった。

今回の検討は地上での観測データをモデルに組み込んで計算を行った結果を示した。計算結果と観測結果に大きな隔たりがあった理由としては、モデル内の大気の状態は地上から上空まで設定されていることから、数地点の地上観測点だけをデータに組み込んでモデル内の大気の状態を十分に反映させることができなかつたことが考えられる。そのため、気象レーダーなどの機器で観測される上空の風や水蒸気の観測データを初期・境界条件に組み込んで、鉄道の気象災害の防止に活用できる精度への向上をはかる計画である。

5. おわりに

鉄道沿線に設置されている風速計や雨量計から随時得られているデータはいわゆる「点」のデータである。近年はレーダーなどによる観測技術が発達してきており「面」的な情報を得ることが可能となってきた。しかしながら、必ずしも鉄道防災に活用し得る分解能では整備されていない。

そこで、風速計や雨量計が設置されていない箇所での値を補間し、鉄道で必要とされる時間・空間間隔で面的な気象情報を得るために、近年天気予報や気象の研究でよく用いられている気象の数値シミュレーションモデルを用いて強風、大雨、大雪事例の数値計算を行い、計算結果と別途行った観測結果とを比較した。

その結果、強風や大雨が発生する時間帯や場所にずれがあることや、絶対値が観測結果と必ずしも一致している結果までは得られなかつたものの、風速値や降水量については定性的には再現できることがわかった。このことにより、強風や大雨現象をもたらす気象現象がどのよ

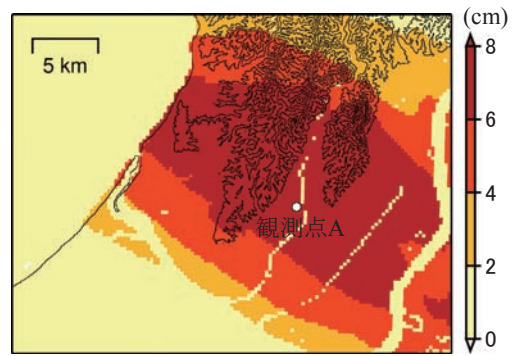


図 13 観測データを組み込んで計算したときの 12 時間の積雪深変化量の面的分布 (1 月 8 日 12:00 ~ 24:00)

うな空間構造を持っているかを把握することが可能となる。また、計算精度の向上のため、独自に行った観測データをモデルに組み込んだ計算を行ったが、地上の数地点のデータのみではモデル内の大気の状態が一部しか反映されないため、精度向上には上空の風や水蒸気など他のデータもあわせて組み込む必要があることがわかった。

観測結果を十分に再現できる結果が数値計算で得られるようになれば、数値計算により過去に災害をもたらした気象現象がどこで発生しやすいかがわかるようになり、鉄道防災に大いに活用できると考えられる。今後は、大気と海上の水蒸気などのやりとりを適切に再現すること、地上の観測データに加えて上空での風や水蒸気のデータをモデルに組み込むことといった課題を克服して、数値計算の再現精度の向上をはかる予定である。

文 献

- 1) 気象庁：さまざまな気象現象
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-1-2.html>
 (参照日：2015 年 12 月 1 日)
- 2) 荒木啓司, 福原隆彰, 島村泰介, 今井俊昭：数値解析手法を用いた鉄道沿線における強風箇所抽出方法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.5, pp.29-34, 2010
- 3) 福原隆彰, 荒木啓司, 谷本早紀：局地風を考慮した強風箇所抽出方法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.23-28, 2013
- 4) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, 113pp, 2008.
- 5) 竹見哲也：境界層・雲微物理過程のモデル化に対する局地豪雨の感度実験, 京都大学防災研究所年報, 第 54 号 B, pp. 293-301, 2011
- 6) 気象庁：警報・注意報発表基準一覧表
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kijun/index.html>
 (参照日：2015 年 6 月 14 日)