

降水予測の最前線



瀬古 弘
Hiromu Seko

気象庁 気象研究所 予報研究部
第二研究室 室長

[専門分野] データ同化, アンサンブル予報,
メソスケール現象の解析

鉄道の運行と局地的豪雨

豪雨や大雪などの悪天候は鉄道などの運行に大きく影響を与えます。平成26年2月14日の記録的な大雪では中央線の列車が数日にわたって立ち往生しました。また今回取り上げる局地的豪雨でも、平成24年9月24日に京急本線の線路内へ崖崩れによる土砂が流れ込んで、脱線事故が起きています。

局地的豪雨を含む強い雨は、**図1**に示した‘10分間に15mm以上の雨が降る頻度’や‘1位の10分間降水量’の経年変化でも読み取れるように、次第に激しく頻繁になってきています¹⁾。局地的豪雨による災害を減すためには、リードタイムのより長い正確な予報が必要になりますが、局地的豪雨では短時間に狭い範囲で激しい雨になるために、数値モデルを用いた予測は容易ではありません。気象研究所では、この問題を克服するために、より高度な数値モデルの開発や天気予報の元となる数値予報の初期値(大気を多くの格子点で表現します)を改善する手法を開

発しています。今回は、数値予報の初期値の改善法と、その手法を局地的豪雨に適用した結果の例について紹介します。

数値モデルと観測データ

まず、数値モデルの初期値作成が、天気予報のどの過程で行われているかを、‘天気予報の概要’の模式図(**図2**)を用いて見てみましょう。天気予報を作成する過程は、‘1.観測’から‘5.天気予報’までに大きく分けることができます。‘3.数値モデル’では、積雲対流などの大気の多くの複雑なプロセスを

表現した数値モデルを用い、初期値から計算を行って、予報値を得ます。その予報値は、‘2.観測データの利用’で、実際に観測したデータにより現実に近い分布に修正され、次の予報の初期値として利用されます。これらの過程は、局地的豪雨のような小さなスケールの予報でも同じで、観測データは初期値を作成するために利用されます。

それでは、どのような観測データが局地的豪雨の予測精度を向上させるのかを考えてみます。積乱雲の一生(**図3**)を見ると、積乱雲は湿った気塊が下層の水平風の収束(ぶつかりあう

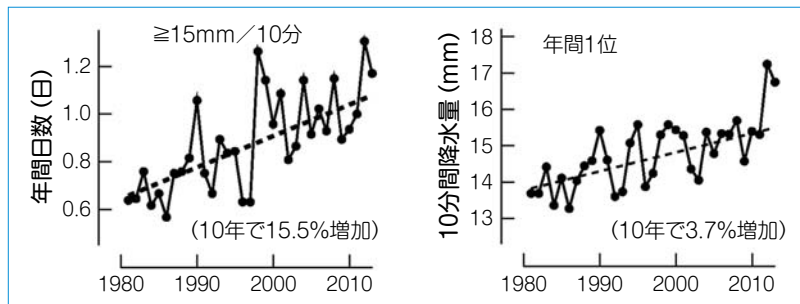


図1 国内141地点の平均で求めた10分間に15mm以上の降水量が観測された日数(左)と10分間降水量の年間1位の値の経年変化(右)¹⁾

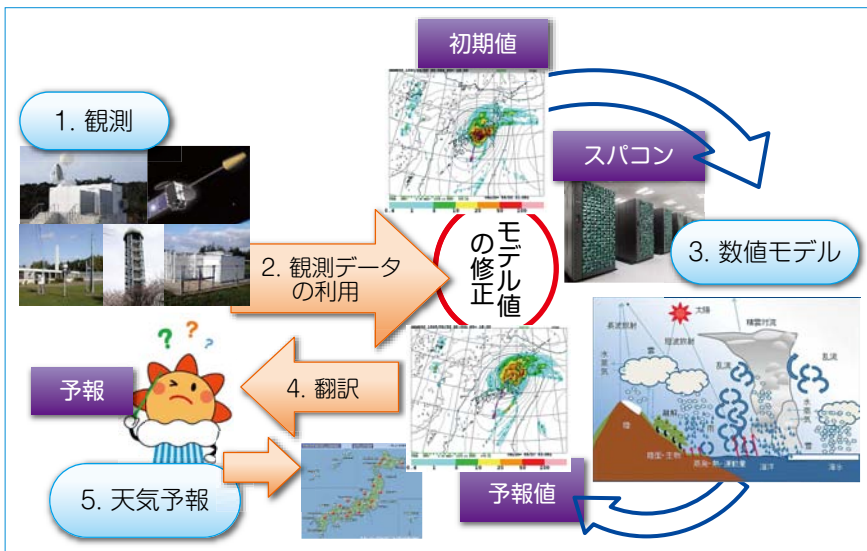


図2 天気予報の概要の模式図

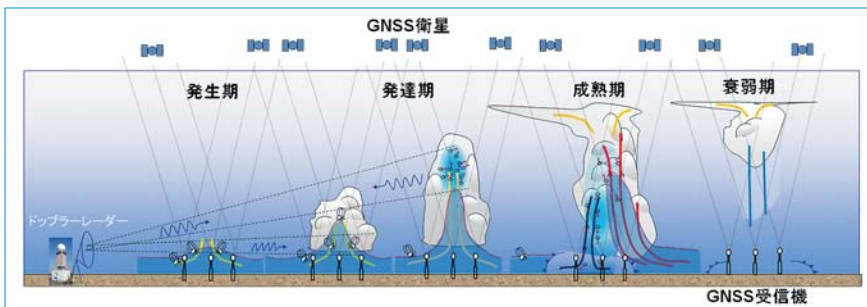


図3 積乱雲の一生とドップラーレーダーやGNSS観測の模式図

こと)により持ち上げられ、その気塊が水蒸気の凝結によって周囲よりも高温になると積乱雲が発達します。つまり、局地的豪雨を解像する高分解能かつ高頻度な下層の水蒸気や水平風の情報が重要です。

下層の水平風や水蒸気の分布を与える観測データには、気象庁のアメダスや気象官署の地上観測データがありますが、それらは水平スケールが数10kmの局地的豪雨を解像するにはやや粗すぎます。そこで、ここでは‘レーダーで得られた風情報’と‘GNSS(全地球航法衛星システム, Global Navigation Satellite Systemの略, GPSもGNSSの一つ)による水蒸気情報’を取り上げました。

レーダーによる風情報は、雨滴などで反射して戻ってきたレーダーの電波の周波数の変化から推定した‘レーダーから遠ざかる(もしくは近づく)方向の風(動径風)’です。ここでは、

雨滴が水平方向には水平風と同じ速度で移動するという仮定を用いています。図4は、1999年に発生した練馬豪雨の大雨をもたらした積乱雲の雨域が現れる直前のレーダーのエコー分布です。練馬豪雨の発生した東京都東部には雨域はありません(図4左)が、通常の降水表示に使われない弱い反射強度まで見ると、細かな多くの小さいエコー域があって、図4(右)の矢印で示すように収束しています。これは体長数mm程度の小型の昆虫などによる降水を伴わないエコー(非降水エコー)で、雨滴と同様に風と同じ速度で移動することがわかっています²⁾。この非降水エコーを用いると、降水域よりも広範囲

の風分布が得られ、積乱雲を引き起こす大気下層の収束の情報を得ることができます。

水蒸気量については、GNSS可降水量を用いました。このデータは、GNSS衛星から送信した電波が、地上の受信機に到達するまでに、経路上の水蒸気により遅れる特徴を利用して求めた‘水蒸気量の天頂方向の積算値’です。図5(右)は、練馬豪雨の発生直前のGNSS可降水量を地上の水蒸気量で割った指数’です。地上の水蒸気量で割ることにより、受信機の標高の影響を除き、下層の湿った空気がどの程度の高さまで分布しているかを示すようになります。豪雨をもたらす降水域の発生30分前(14時)は、関東南部が日射で温まっていることや、その北側で降水により冷えているために、練馬付近は周囲よりも高温で、そのために気圧も低く、水平風がそこで収束していました(図5左)。そして、その収束域では、降水エコーの出現前に‘指数’が周囲より大きくなっていました(図5右)。このことは、GNSS可降水量が、積乱雲発生時の‘下層の湿った空気が持ち上げられている’という情報を持っていることを示しています。

カルマンフィルターを用いた局地的豪雨の再現実験

一般に、夏季に首都圏で発生する局地的豪雨は弱い収束内で発生することが多く、これを数値モデルで予測する場合、初期値の僅かな差で発生する場所や時間が大きく変わります。また、初期値にも誤差が含まれていて、確率

☞ ノイズはシグナル？

GNSSは、カーナビでも使われるように、もともと測位の道具です。国土地理院はGNSSを用いて地面の動きをmm単位で測定していますが、その場合、水蒸気量が測位の誤差要因になります。ここでは、その誤差要因である水蒸気量を観測値として使っています。先の非降水エコーも雨の観測の立場からはノイズです。「ある人には‘ごみ’でも、他のある人にとっては‘宝物’」ということで、面白いですね。

分布を考慮した予報が望ましいと考えられます。そのため、観測データを用いて、初期値に含まれる誤差の範囲内に入る新たな複数の初期値を作成しました。

この方法を用いた実験の模式図を図6に示します。局地的豪雨の再現のためには、豪雨を発生させるような数100km程度の収束(図6下では、相模湾・房総半島からの赤い気流と鹿島灘からの青い気流による収束が、局地的豪雨を発生させています)と、個々の積乱雲の位置や強さを同時に再現することが必要です。そのため、大きなスケールの収束を再現する格子間隔15kmのアンサンブルカルマンフィルタ(わずかに変えた複数の初期値から予報を行う手法)と、個々の積乱雲の位置・強さを再現する格子間隔約2kmのものを組み合わせたシステムを開発しました³⁾。

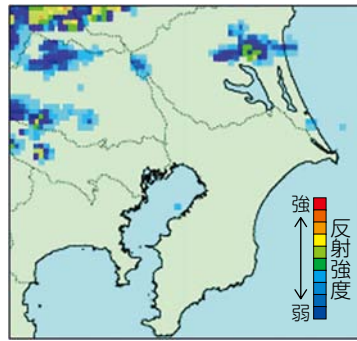
図6上は、そのシステムの模式図で、それぞれ青色や赤色の矢印とだ円が並んでいますが、矢印が予報、だ円が初期値の作成を、青色が親モデル、緑色が子モデルの境界値を作成するためのモデル、赤色が子モデルを示しています。次に、2008年9月5日に堺市で発生した局地的豪雨を例にとって紹介します。局地的豪雨によって、堺市のアメダス観測点では14時50分から1時間に93.5mmの強い雨が観測されました(図7左、局地的豪雨を起こした降水水域を細い矢印で示す)。図7(右)で示した16時は成熟期に当たり、強い降水水域が時間とともに北西にのびていきました。この局地的豪雨を、先ほど紹介したアンサンブルカルマンフィルタを用いたシステムに適用し、北西にのびる強い降水水域の再現を目指します。

まず、気象庁の現業のデータ(大気高層の気圧や気温、湿度などの気象データを得るゾンデ観測など。時間・空間的に比較的粗い)を用いて初期値を作

成した場合、格子15kmでは、局地的豪雨は水平スケールが小さいため、近畿地方の降水域は弱い降水として表現されました(図8左)。格子間隔2kmになると、実際より1時間ほど遅れますが、図8(右)に赤いだ円で示したように、

観測と似た降水分布がある程度再現されています。これらの図で降水が弱く広がっているのは、複数の予報を平均したためです。しかし、よく見てみると、矢印で示した堺市付近の降水はとて弱く、豪雨を再現できていません。

現業レーダーの反射強度(14時30分)



羽田レーダーの動径風(14時30分)

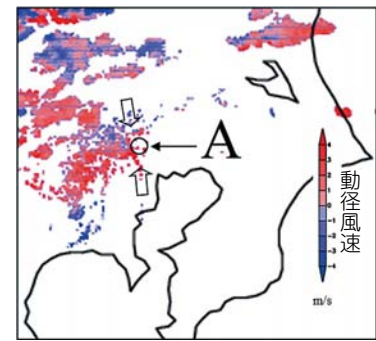


図4 1999年の練馬豪雨発生直前のレーダーの雨域(左)と動径風速(非降水ウコーを含む)(右)。Aは練馬豪雨をもたらした積乱雲の発生位置を示す。

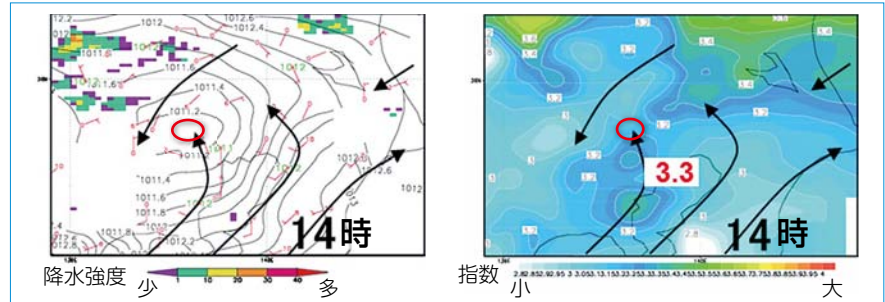


図5 練馬豪雨発生直前の気圧分布(hPa)と水平風(左)、可降水量を地上水蒸気量で割った値(指数)(km)(右)。

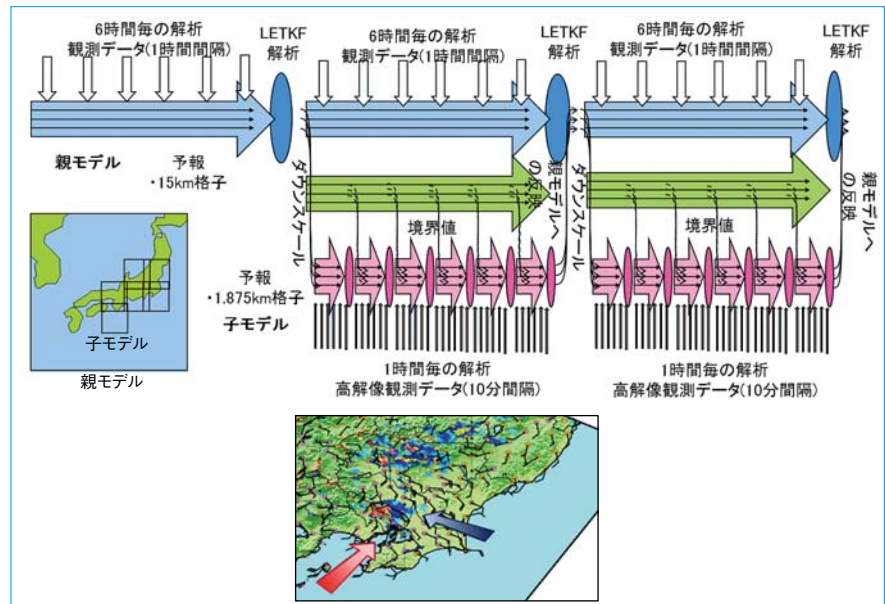


図6 (上) アンサンブルカルマンフィルタを用いた実験の模式図と、(下) 練馬豪雨発生時の降水水域と水平風分布。地形にはアメリカ地質調査所(USGS)のGTOPO30(全世界の陸地における1kmメッシュの数値地形モデル)を用いました。

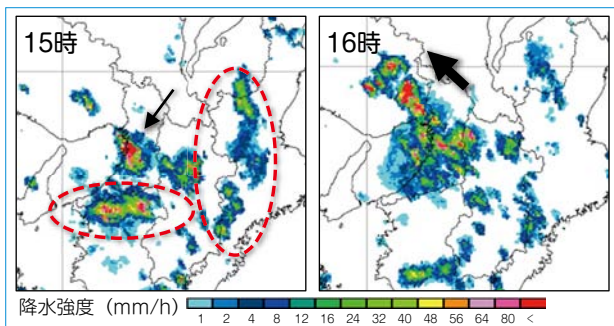


図7 気象庁の現業レーダー観測による2008年9月5日の降水分布。

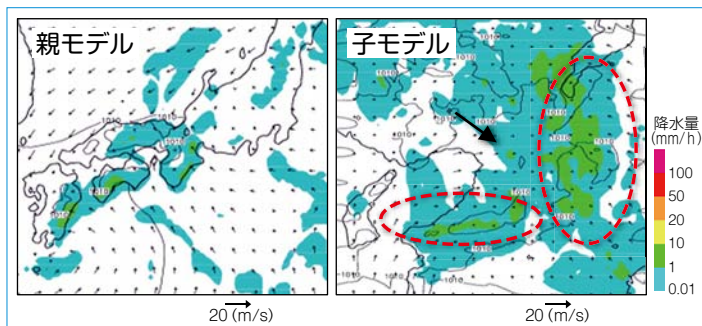


図8 モデルで再現した15時のアンサンブル平均の降水量。観測に比べ、堺市の降水が弱いことがわかる。

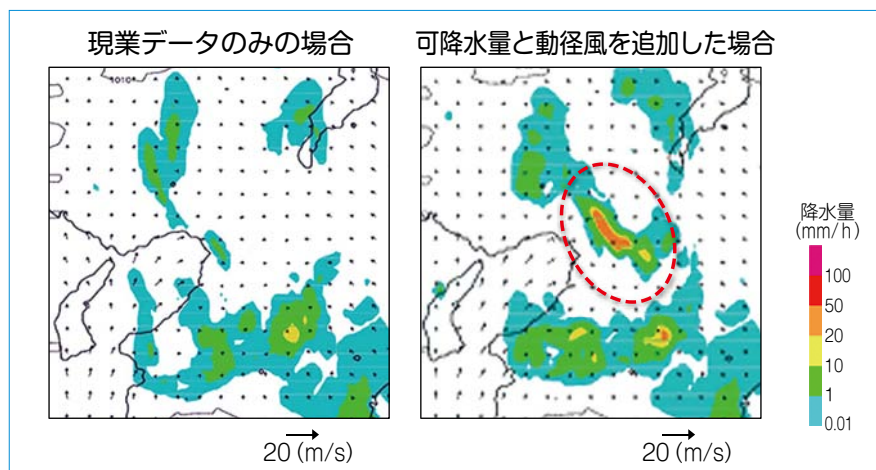


図9 初期値を修正するデータに動径風と可降水量を加えない場合(左)と加えた場合(右)の降水分布。これらのデータを加えると北西にのびた降水域が再現された。

そこで、より高分解能な観測データであるドップラーレーダー(関西国際空港と大阪国際空港)の動径風と、国土地理院のGNSS可降水量データを、初期値を修正するデータに加えました。GNSS可降水量データを用いると、多くの予報で水蒸気量が改善されて、主に降水強度が強くなり、ドップラーレーダーの動径風を用いると、強い降水域の位置が改善されました(図省略)。一度に両方を用いると、図9で赤い円で示したように、強度と位置が同時に改善されました(図9は改善された予報のうちの一つです)。これらの結果は、先述のように、下層の水蒸気の収束が、局部的豪雨の予報精度向上の重要な要因の一つであることを示し、数時間後に強雨をもたらすような局部的豪雨も、今回のような高分解能な観測データを用いることにより、予測が可能になることを示唆しています。

まとめ

空間・時間スケールの小さい局地的豪雨の予報精度向上のために、(1)「局地的豪雨の積乱雲やそれを発生させる収束を同時に再現するシステムの開発」や、効率的なシステムの開発に欠かせない(2)「局地的豪雨発生前の下層収束やそれに伴う可降水量の増加などの現象の理解」、さらにそのためには(3)「非降水エコーやGNSS可降水量等の高分解能な観測データ」が必要であることを紹介しました。今回の紹介した手法が、気象庁の現業予報に採用されるまでに、まだ時間がかかると思われませんが、引き続き、局部的豪雨などの予報精度向上に向けて、より詳細な情報を持つ新しい観測データの利用や、より高分解能な観測データを活かす同化法の開発を行う予定です。

今回は、数値モデルを用いて予測する研究を紹介しました。数値モデルで

はなく、レーダーで観測された降水情報を防災に役立てるプロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」(<http://www.mpsep.jp>)が行われ、気象研究所も参加しています。鉄道事業者も防災に役立てるために、このプロジェクトに参加しています。今後も、鉄道事業者の皆さんと防災に役立つ情報の共有等ができるような良好な関係を構築・維持できることを願っています。

謝辞

GPSデータとレーダーデータは、国土地理院、気象庁観測部から頂きました。ここに記して感謝します。また、この記事の執筆の機会を頂いたことに深く感謝いたします。RRR

文献

- 1) Fujibe, F.: Clausius-Clapeyron-like relationship in multidecadal changes of extreme short-term precipitation and temperature in Japan. *Atmosph. Sci. Lett.*, Vol.14, pp.127-132, 2013
- 2) Kusunoki, K.: A preliminary survey of clear-air echo appearances over the Kanto plain in Japan from July to December 1997. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol.19, pp.1063-1072, 2002
- 3) Seko, H., Tsuyuki, T., Saito, K., and Miyoshi, T.: Development of a two-way nested LETKF system for cloud-resolving model. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol.II)*, pp.489-507, 2013