

水蒸気量の鉛直分布のデータ同化による 降水予測精度へのインパクト評価

山口弘誠*・中北英一・古本淳一**

* 京都大学生存基盤科学研究ユニット

** 京都大学生存圏研究所

要 旨

気象モデルを用いた短時間降水予測において、水蒸気は全ての降水の源であり、水蒸気量をデータ同化しモデル初期値を適切に与えることがますます重要になってきている。最近の研究で、GPS遅延量観測と鉛直方向の音波観測を組み合わせることで水蒸気量の鉛直分布を推定することが可能であることがわかってきているため、既往研究における可降水量（水蒸気量の鉛直積算）のデータ同化で問題となっていた鉛直方向の分配問題が解決できるという状況にある。そこで本研究では、将来、水蒸気の鉛直分布が観測可能となった場合を想定して、水蒸気量の鉛直分布をデータ同化し降水予測への効果を調べた。データ同化システムCReSS-LETKFを用いた理想実験によって水蒸気量の鉛直分布のデータ同化をおこなったところ、2時間先の降水予測にまで効果が続くことを確認できた。成果の一つとして、CReSS-LETKFに水蒸気のデータ同化モジュールを構築した。また最後に、偏波レーダーのみから水蒸気量を推定する手法の素案を示した。

キーワード： 降水予測，データ同化，可降水量

1. はじめに

近年、都市部で豪雨災害が頻発しており、人類の持続的生存の基盤を築くために、河川流出管理・ダム操作・下水道の排水処理といった防災の観点から、数時間先～半日先における降水量を高精度に予測することが極めて重要である。豪雨災害をもたらす大気の現象のスケールの多くはメソβスケールであり、その予測は非常に難しい。メソβスケールの現象は、雨域の連続観測から時間的に外挿する運動学的手法の適用範囲を超えているため、力学・物理学に基づいた数値予報モデルを使う必要がある。数値予報の問題として、予測対象の現象が表現可能かどうか、それを表現する分解能があるかどうか、などが挙げられるが、それらと同様に、初期値が適切に与えられているかどうか、という問題も非常に重要である。最適な初期値を与えるために最も有効な手法として、観測情報のデータ同化がある。

データ同化とは、時間的・空間的に限られたデータ（観測情報）から、モデル（理論）を満足する初

期条件、境界条件、あるいはモデルに含まれる係数、を求めることである。その目的の一つは、データ同化によって推定された真の状態と考えられる値（解析値）をモデルの初期値として将来予測をすることであり、予測精度を上げるためにも効果的なデータ同化が期待されている。さて、気象学の分野において、データ同化によって求められた解析値は、予報モデルの初期値としてはもちろんのこと、過去の再解析データを用いて様々な研究がなされている。そのようなことから、より良いデータ同化システムを開発していくことは重要な課題である。

さて、yamaguchi et al. (2009) はスーパーセルに対する降水予測の理想実験を行い、同化した観測値の違いによる降水予測に対する効果的な予測リードタイムを示しており、修正したものを Fig. 2 に示す。これを見ると、レーダー反射強度のみを同化した場合は、予測リードタイムのごく初期期間のみに高い効果があるものの、継続時間は極めて短い。固体降水を同化した場合は、レーダー反射強度を同化した場合よりも少し先の予測リードタイムにおける効果

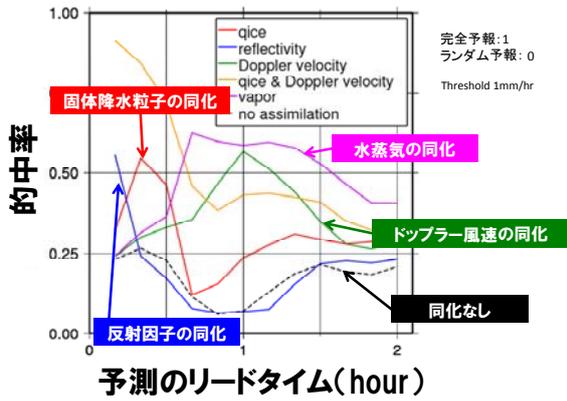


Fig. 1 Effective forecast lead time due to a difference in observational data which is to be assimilated.



Fig. 2 Overview of this study

が高い。水蒸気を同化した場合は、どの場合よりも先の予測リードタイムにおける効果が大きく、その効果の継続時間も長いことがわかる。それは、水蒸気が全ての降水の源であることに他ならない。

一方で現業の予測手法では GPS 遅延量観測による可降水量、すなわち水蒸気の鉛直積算量（しかも空間的に疎である）をデータ同化しているに過ぎず、水蒸気量の鉛直・空間分布を適切に表現することができないために、効果的な降水予測の向上には至っていない。さて、最先端の研究レベルにおける水蒸気観測手法として、GPS 遅延量観測と鉛直方向の音波観測を組み合わせることで水蒸気の鉛直分布を推定することができる (Furumoto et al., 2007)。そこで、水蒸気量の鉛直分布をモデルへデータ同化する手法を開発することで、従来までの鉛直積算量をデータ同化する場合と比較してどれほど降水予測へ効果があるのか明らかにする。加えて、日本において国土交通省による Xバンド（小型）の偏波ドップラーレーダー網が現業用として平成 22 年度から都市部に

配備された。これまでに確立してきたレーダー反射因子とドップラー風速の同化に加えて、本研究で水蒸気量をデータ同化することで、複数の観測情報のデータ同化による相乗効果が期待できるかどうかということも考慮している。Fig. 2 に研究像の枠組みを示す。

2. 水蒸気量の鉛直分布の推定に関する既往研究

本章では、Furumoto et al. (2007) が提案する水蒸気量の鉛直分布の推定手法について概説する。Fig. 3 にその原理の大枠を示す。まず、GPS 観測によって得ることができる GPS 遅延量は、大気中の水蒸気量などに由来しており、水蒸気によるものを抽出する

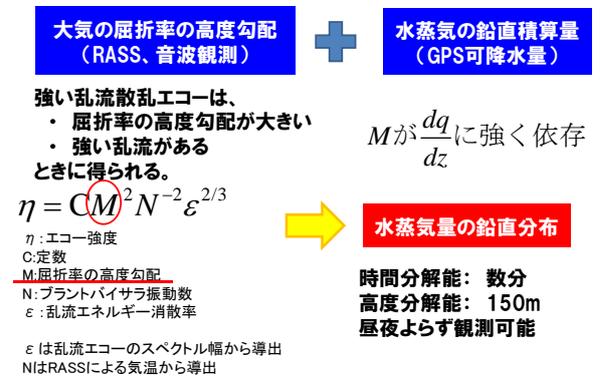


Fig. 3 Overview of estimation method of the vertical profile of vapor

ことで、電波経路における水蒸気量の積算を測定することが可能である。また、鉛直方向上向きに音波を出し大気乱流散乱エコーを受けると、そのエコーは大気屈折率の高度勾配に依存し、さらにその大気屈折率の高度勾配は水蒸気量の高度勾配に強く依存しているため、水蒸気量の鉛直分布を推定することが可能である。ただし、Fig. 3 に示すように、大気乱流散乱エコーに含まれる大気屈折率の高度勾配は、2 乗のオーダーとして寄与しているため、何らかの第一推定値から大気屈折率の高度勾配の正負を決めながら全体の積算量となるように推定するという工夫が必要である。

3. 可降水量による2009年6月の降雨の解析

可降水量 (Precipitable Water Vapor; PWV) とは、地表のある面を基点としてその上空の大気を大きな鉛直の柱として考えたときに、そこに含まれる水蒸気や雲が全て凝結して地上に降ってきたとしたとき

の降水量のことである。可降水量の時間増加量はつまり、水蒸気量の収束を意味するので、降水との相関が非常に高いものである。Fig. 4 に 2009 年 6 月 4 日のある瞬間における可降水量の分布を示す。基本的には、緯度が低いほど、また、観測点の高度が低いほど可降水量が高い。これは水蒸気量が気温によって飽和水蒸気量が決まっており、特に水蒸気量は地表付近絶対量が大きいため、このような分布をする。また、全球平均量は約 30mm といわれている。

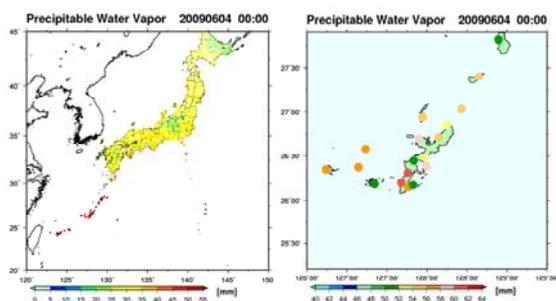


Fig. 4 Precipitable water vapor
(left: Japan, right: okinawa)

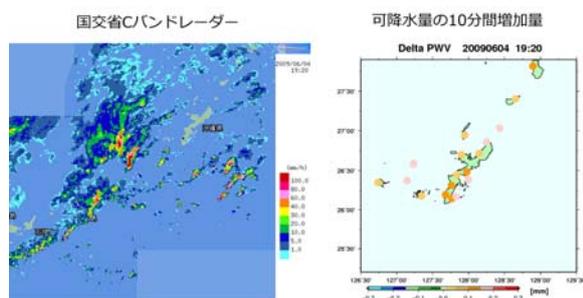


Fig. 5 Radar echo and increment of PWV

Fig. 5 に、2009 年 6 月 4 日 19:20 におけるレーダーエコーと沖縄における可降水量の 10 分間増加量を示すが、このように降水の直前には水蒸気が溜まってきて、可降水量が増加傾向にあることがわかる。よって、これを同化することに降水予測への効果は非常に高い。ただし、これは鉛直積算量であり、鉛直方向にどのように配分するのかという問題があり、現状ではモデルの第一推定値の割合を利用するなどといった手法がとられている。

4. 理想実験による水蒸気量の鉛直分布のデータ同化実験

4.1 計算条件の設定

水蒸気量の鉛直分布の推定手法においては、音波

観測による乱流散乱エコーと第一推定値として用いるラジオゾンデ観測データが必要であり、本研究の将来目的である偏波レーダーとの組み合わせによるデータ同化を考えると 3 者のデータが整っている観測が必要であり、実現への適用は今後の目標とする。そこで本研究では、Observing System Simulation Experiment (OSSE)を用いた理想実験を実施し、予測モデルが完全であるという仮定のもと、水蒸気量の鉛直分布のデータ同化によって降水予測精度を評価する。データ同化システムとして CReSS-LETKF (Yamaguchi et al., 2008) を用いた。各種の計算条件を Fig. 6 に示す。2009 年 6 月 4 日の沖縄で発生した降雨に対する一つのモデルランを真値とし、また初期時刻のみを変えた別のモデルランを同化なしのコントロールランとして、水蒸気量を同化することによる降水予測精度への効果を調べる。

計算条件 (CReSS)

- 初期値・境界値: GPV(MSM)
- 海面温度: NEAR-GOOS
- grids: 248 × 248 × 50
- interval: $\Delta x = \Delta y = 2000\text{m}$, $\Delta z = 300\text{m}$

計算条件 (LETKF)

- 同化期間: 30分間
- 同化間隔: 10分間ごと
- Local patch: 水平 ±15km、鉛直 ±1km
- サンプル数: 30メンバー

Fig. 6 Setting-up of CReSS-LETKF

4.2 計算結果

Fig.7 に、2 時間先降水予測の計算結果を示す。カラーで地上降水強度、ベクトルで地上 1.5km における水平風を示す。点線丸印で囲んだ場所に存在する降水システムに関して、現象の 3 時間前から予測を開始した真値ランにおいては、強い降水強度を示している。また、Fig.8 にその時刻における実際の GPS 可降水量 (水蒸気量の鉛直積算量) の 10 分間増加量の観測値を見ると、高値を示しており将来的には実現でも水蒸気を同化することによる効果が期待できる。さて、真値ランよりもさらに 3 時間前から予測を開始したコントロールラン ((c)同化なし) においては、その降水システムすら予測できていない。それに対して、水蒸気量の鉛直分布を同化したラン ((b)同化あり) では、真値と似通った形で降水システムが形成されていることがわかる。よって、水蒸気量の鉛直分布の同化による効果は非常に大きいことが示された。ただし、現業観測がなされている GPS 可

降水量による水蒸気の鉛直積算量のデータ同化した場合との比較を今後実施していく必要がある。加えて、どの高度のデータ同化のインパクトが大きいのかを解析していく。

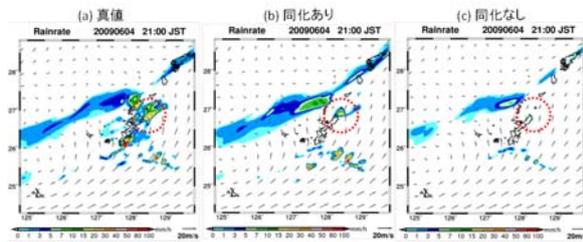


Fig. 7 Precipitation Forecast results at 2-hr ahead

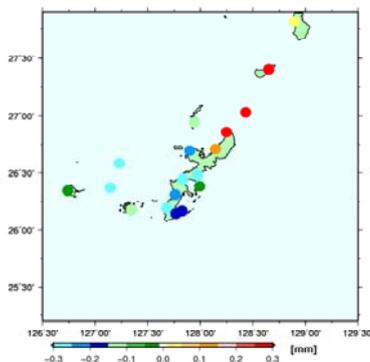


Fig. 8 10-min increment of precipitable water vapor

5. 結論と今後の展望

さて、水蒸気量の鉛直分布を観測するには音波観測が必要であり、環境への負荷を考えると都市部への現業配備は現実的に困難である。よって、偏波レーダーのみによる水蒸気量の推定が強く望まれる。最後にその案を示す。Kobayashi (1961) などで知られるように、過飽和水蒸気量と気温の関係によって降水粒子の形成過程が異なり雪結晶の形が分類される。この関係を利用して、偏波レーダーから算出す

ることができる降水粒子の種別や形状をデータ同化することで、水蒸気量を抽出する手法を開発したい。そのために、固相粒子種類を柱状粒子や平板粒子など細分化して分類する必要があり、未だ利用されていない偏波レーダーの観測パラメータである直線偏波抑圧比と呼ばれる粒子の扁平度や主軸の傾きに関する情報を用いることができる。よって、降水粒子の形成過程を通すという新たな概念によって、偏波レーダーのみによる水蒸気量の推定を目指す。

謝 辞

偏波レーダー COBRA の観測データをご提供して頂いた(独)情報通信研究機構に謝意を表します。

参考文献

- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturations. *Philos. Mag.*, Vol. 6, pp. 1363–1370.
- Furumoto, J., S. Imura, T. Tsuda, H. Seko, T. Tsuyuki, K. Saito, The Variational Assimilation Method for the Retrieval of Humidity Profiles with the Wind-profiling Radar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 24, 1525–1545, 2007.
- Yamaguchi, K., Eiichi Nakakita, and Yasuhiko Sumida, 2009: Data assimilation of hydrometeor types estimated from the polarimetric radar observation. *Proc. of World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting*, 7 pp. in CD-ROM.
- Yamaguchi K., and Eiichi Nakakita, 2008: Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data using the cloud-resolving non-hydrostatic model with an aim to introduce polarimetric radar data assimilation. *Proc. of 7th International Symposium on Weather Radar and Hydrology*, 3 pp. in CD-ROM.

Data Assimilation of the Vertical Profile of Water Vapor and Its Effects on Quantitative Precipitation Forecasting

Kosei YAMAGUCHI*, Eiichi NAKAKITA and Junichi Furumoto**

* Institute of Sustainability Science, Kyoto University

**Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Synopsis

It is important for 0-6 hour nowcasting to provide for a high-quality initial condition in a meso-scale atmospheric model by a data assimilation of several observation data. It is getting more important to assimilate the water vapor for numerical weather prediction, because vapor is a source of any kind of precipitation. The vertical profile of water vapor can be estimated by the combination of GPS precipitable water and the echo profile of the sound. In this study, an impact of the assimilation of the vertical profile of vapor on accuracy for QPE is evaluated. As an implementation, the cloud-resolving non-hydrostatic atmospheric model, CReSS, which has detail microphysical processes, is employed as a forecast model. The local ensemble transform Kalman filter, LETKF, is used as a data assimilation method, which uses an ensemble of short-term forecasts to estimate the flow-dependent background error covariance required in data assimilation. A heavy rainfall event occurred in Okinawa in 2009 is chosen as an application. As the ideal experiment was carried out, the effect of that assimilation still continued for two hours forecast lead time.

Keywords: quantitative precipitation forecast, data assimilation, precipitable water