大気遅延除去におけるメソスケール数値予報モデルへの GEONET可降水量データ同化のインパクト -続報-

市川 隆一 (情報通信研究機構)

ホビガートーマス (情報通信研究機構) 宮内結花 (情報通信研究機構) 小司禎教 (気象庁気象研究所)

Data assimilation of GPS precipitable water vapor to NWP model and its impact on ray-traced atmospheric

slant delays -Part 2-

ICHIKAWA Ryuichi (NICT),

HOBIGER Thomas (NICT), SHOJI Yoshinori (MRI, JMA), and MIYAUCHI Yuka (NICT)

Abstract

The "KAshima RAytracing Tools (KARAT)" is capable of calculating total slant delays and ray-bending angles considering real atmospheric phenomena. One advantage of KARAT is that the reduction of atmospheric path delay will become more accurate each time the numerical weather model is improved. On October 27, 2009 the JMA started data assimilation of zenith wet delays obtained by the GPS Earth Observation Network System (GEONET) operated by Geospatial Information Authority of Japan (GSI) for meso-scale NWP model. The improved NWP model data assimilating the GPS PWV data has the potential to correct the atmospheric path delay more precisely. Meteorological Research Institute (MRI) of Japan has evaluated the impact of ground-based GPS precipitable water vapor (GPS PWV) derived from the GEONET on meso-scale NWP model under the localized heavy rainfall event in Tokyo, Japan on 5 August 2008. A terrific thunderstorm occurred across the Kanto area of Japan, and it caused flooding in downtown Tokyo. During the event, the rainfall intensity increased to over 100 mm per hour within thirty minutes. We have assessed the impacts of GPS PWV assimilation into the NWP model on the KARAT correction by comparisons of the precise point positioning (PPP) solutions. In the nationwide scale of Japan, the short time repeatability of the PPP results for both horizontal and height positions applying KARAT correction through the MRI NWP model with GPS PWV assimilation are about several percent better than that through the conventional MRI NPW model w/o GPS PWV assimilation. At the 37 stations showing the large standard deviation of the normalized slant delay differences more than 30 cm, the impact of GPS PWV assimilation is more obvious. The estimated positions obtained by the PPP analysis applying the delay correction using the GPS PWV assimilated NWP model is much improved about 10-50% comparing with those based on the conventional NWP model. In spite of the present model imperfectness and coarse time resolution, we can concluded that the GPS PWV data assimilation is effective to improve the NWP model for applying the GNSS positioning.

1. はじめに

2011 年の地球惑星科学連合大会、及び同年秋の測地学会 において、我々は類似題目でのポスター発表を行った[1][2]。 本研究は、数値予報モデルへの国土地理院 GEONET 水蒸 気情報のデータ同化が GNSS 解析での大気遅延除去の観点 からみてインパクトを持つか否か評価することが目的であ る。これまでに、PPP 解析による局位置 3 成分の短期再現 性を指標として、数値予報モデルへの GEONET/GPS 水蒸 気情報のデータ同化の有りと無しの二つの場合で大気遅延 除去の効果を比較した。 前回までの解析では、日本列島全体を、[1] 北海道域、 [2] 東北域、[3] 関東・中部地域、[4] 西日本域、[5] 太平洋 の離島地域の 5 地域に分けて比較を行ったところ、使用し たデータ期間内に集中豪雨が観測された [3] と [4] の地域で は、双方にあまり差が認められなかった。一方で、比較的 平穏な大気状態であった北海道地域でデータ同化有りの鉛 直成分での再現性が無しに比べて 10%程度向上することが わかった。 以上の結果から、GPS 水蒸気情報を数値予報 モデルにデータ同化することの有効性は一定確認出来た。 しかしながら、GPS 水蒸気情報を取り込むことで、数値予 報モデルによる視線方向の湿潤遅延量の推定精度が向上す



図1 GPS 可降水量をデータ同化した場合としない場合でそれぞれ数値予報モデルで予測 される水蒸気分圧積分量の差(単位は hPa)

ると期待されるにも関わらず、集中豪雨などの水蒸気変動 の顕著な領域で双方の局位置解析結果にあまり差がないこ との理解が難しいという問題が残った。そこで、今回は、 観測点毎の視線遅延量の振る舞いに着目し、より詳細な検 討を試みたので、これを報告する。

2. データと解析

使用した数値予報モデルはこれまでの解析と同じく、気 象庁気象研究所が GEONET/GPS 水蒸気情報のメソスケー ル数値予報モデルへのデータ同化の効果を調べるために計 算したデータである。現業のメソ数値予報モデルと同じ我 が国の領土を覆う範囲、5km 格子、2008 年 8 月 3 日-6 日 の 4 日間分、時間分解能 3 時間のデータであり、GPS 水蒸 気のデータ同化がなされたもの、及びデータ同化無しの双 方がある。図 1 では、データ同化の有無で水蒸気量変動の 予測がどの程度異なるかをプロットしている。ここでは、 地表から 500hPa 面までの水蒸気分圧を積分した量の差と して表現した。水蒸気分圧積分量の差は最大で 50hPa(絶対 値) にも達し、かつ数 10km 程度の非常に小さな空間スケー ルから 1000km にも及ぶ比較的大きなスケールまで認めら れ、様々な空間変動が重畳していることが示唆される。

まず、これらのデータを用い、波線追跡ツール「KARAT [3]」により、利用可能な約 1200 点の GEONET RINEX デー タの遅延量除去を施した。次に、これまで同様に GPSTools Ver.0.64 [4] を用いて RINEX データの PPP 解析を行った。た だし、今回は、比較の対象とする観測点を次のような指標を 元にして抽出した。まず、RINEX ファイルに記載された各 衛星毎の視線遅延量を KARAT により計算する。GPS 水蒸 気情報のデータ同化有りの場合の視線遅延量を $SL_{GPS(i)}$ 、 データ同化無しの場合の視線遅延量を $SL_{NO_GPS(i)}$ 、とす る。"I"の表記は i 番目の衛星という意味であり、これによ り個々の衛星毎の視線遅延量と定義する。次に、双方の残 差 $\Delta SL(i) = SL_{GPS(i)} - SL_{NO_GPS(i)}$ を各衛星毎に求め る。さらに、

$$\Delta SL_{Z(i)} = \sin\theta(i) \times \Delta SL(i) \tag{1}$$

として、天頂方向に投影した正規化残差 $\Delta SL_{Z(i)}$ を求める。ここで、 $\theta(i)$ は、i 番目の衛星の仰角である。最後に、各観測点毎に得られた $\Delta SL_{Z(i)}$ の標準偏差 $SD_{\Delta SL_Z}$ を

$$(SD_{\Delta SL_Z})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\Delta SL_{Z(i)} - \overline{\Delta SL_Z})^2$$
(2)

により計算する。 $\overline{\Delta SL_Z}$ は N 個の衛星について得られた $\Delta SL_{Z(i)}$ の平均値である。ここでは、1日毎の変化、及び 期間全体の平均のぞれぞれを調べるために、1日毎、及び 8月2-6日の4日間通してのデータのそれぞれで標準偏差 を計算した。仮に、GPS 水蒸気情報のデータ同化を行うこ とで数値予報モデルの精度が向上すると仮定すれば、上記 の標準偏差が大きいほど視線遅延量の計算で大きな改善が あり、かつ該当する RINEX ファイルに対してより効果的 な視線遅延量除去が成されたと考えることが出来る。こう して得られた4日間のデータをすべて使って得られた標準 偏差の分布を示した例が図2である。図には示さないが、 GPS 水蒸気情報のデータ同化の有無で標準偏差が 30 mm 以上の値を示す観測点周辺での水蒸気の空間分布に顕著な 差が認められていた。すなわち、ここで用いた標準偏差の 大きさが双方の数値予報モデルでの水蒸気の時空分布の違 いを示す指標として妥当であることを示唆する。



図 2 視線遅延差を天頂方向に投影した値 (Δ*SL_Z*/本文参照)の標 準偏差 (単位は mm)

3. 結 果

まず、特に顕著な結果として 2008 年 8 月 5 日 (通算日



図3 ΔSL_Z(本文参照)の標準偏差が30mm 以上を示す観測点分 布(単位は mm)

218 日) の東海・関東地域の例を示す (図 3)。さらに、図 3 中の観測点 950228(世田谷)、及び 93026(神奈川川崎) につ いて同日の RINEX データを用い、5 分毎に PPP 解析した 結果の 3 成分測位解の再現性を図 4 に示した。この図で は、KARAT の他、最近の解析で使用されるマッピング関 数 (GMF [6]、VMF1 [5]、及び VMF1 と勾配マッピング関 数 [7] の組み合わせ) による結果と比較した例も併せて示 した。

これら2観測点の例で示すように、GPS 水蒸気情報を データ同化することによる効果は著しく、GPS 可降水量を データ同化しない場合に比べて各成分で 10-50%の RMS の 向上が見られる。一方、逆に劣化した成分 (950228 の南北 成分や 93034 の東西成分) も一部に認められる。現時点で は原因はわからないものの、数値予報モデルで追随が難し い大気構造や衛星配置の影響が予想される。また、既報に もあるように、特に水平成分については VMF1 に勾配マッ ピング関数を組みあせた場合が最も再現性が良いこともわ かる。ここで使用した数値予報データの時間分解能1時間 に対して、今回の PPP 解析では5分毎の処理であり、実際 の水蒸気変動に対して時間分解能が不足していることを示 唆している。さらに、図3で示される関東地域37観測点に ついて、4日間の測位解の再現性をまとめたのが図5であ る。GPS 可降水量データ同化の効果が小さい観測点も含ま れるため、個々の観測点で議論するよりは再現性向上の効 果が小さいが、それでも特に東西成分で 10%以上 GPS 可 降水量データ同化した場合のほうが再現性が良い。



図 4 観測点毎の PPP 解析の測位解の再現性 (上は 950228[世田 谷]、及び下は 93026[神奈川川崎])



図 5 関東地方 37 観測点で得られた PPP 測位解の再現性 (2008 年 8月 2-6日の4日間のデータで得られたもの)

4. まとめ

昨年までの解析に引き続き、数値予報モデルへの GEONET/GPS 水蒸気情報のデータ同化が測地解析に与 えるインパクトを PPP 解析結果の短期再現性で評価した。 今回、データ同化の有無で生じる視線遅延量差を天頂方向 に投影した値の標準偏差を指標とし、データ同化の効果が 大きいと期待される観測点を抽出した上で、PPP 解析によ る局位置結果を比較した。今回解析した範囲では、局位置 の向上が顕著に認められた。一方で、現状の数値予報デー タの限界、特に時間分解能の不足が明らかと考えられる こともわかった。今後、WRF モデル (Weather Research and Forecasting Model/例えば [8] 参照) など、メソスケールの数 値予報モデルを用いてより高時間分解能のデータを独自に 計算した場合で検証することを考えている。

謝辞 本研究では、国土地理院 GEONET から得られた GPS データを解析に用いた。また、科学研究費補助金 (No. 21241043) の助成を受けた。記して感謝の意とする。

参考文献

- [1] 市川他、大気遅延除去におけるメソスケール数値予報モデ ルへの GEONET 可降水量データ同化のインパクト、地球惑 星科学連合大会、2011.
- [2] 市川他、大気遅延除去におけるメソスケール数値予報モデ ルへの GEONET 可降水量データ同化のインパクト -その2 (2011 年連合大会発表の訂正)-、日本測地学会第 116 講演会.
- [3] Hobiger et al., Fast and accurate ray-tracing algorithms for realtime space geodetic applications using numerical weather models, J. Geophys. Res., 113(D203027):1.14, 2008.
- [4] Takasu and Kasai. Evaluation of GPS Precise Point Positioning (PPP) Accuracy, IEICE Technical Report, 105(208), 40-45, 2005.
- [5] Boehm and Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, Geophys. Res. Lett., 31, L01603, DOI:10.1029/2003GL018984, 2004.
- [6] Boehm et al., Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, Geophys. Res. Lett., 33, L07304, DOI: 10.1029/2005GL025546, 2006.
- [7] Chen, G. and T. A. Herring, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, Geophys, Res. Lett., 102, 20489-20502, 1997.
- [8] http://www.wrf-model.org/index.php