

2F11 数値天気予報データを用いた大気遅延推定ツールKARATと従来の大気モデルとの比較

○市川隆一† トーマスホビガー 後藤 忠広 小山 泰弘

近藤哲朗（情報通信研究機構）

E-mail: †richi@nict.go.jp

An Evaluation of the Practicability of Current Mapping Functions using Ray-traced Delays from JMA Mesoscale Numerical Weather Data

Ryuichi ICHIKAWA , Thomas HOBIGER ,

Tdahiro GOTOH , Yasuhiro KOYAMA , and Tetsuro KONDO

(NATIONAL INSTITUTE OF INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY)

E-mail: †richi@nict.go.jp

Key words: GNSS, VLBI, atmospheric path delay, numerical weather prediction model, mapping function

Abstract

We have estimated atmospheric slant delays using the KASHIMA RAYtracing Tools (KARAT) through the Japan Meteorological Agency (JMA) meso-scale analysis data (MANAL data). The comparisons between KARAT-based slant delays and empirical mapping functions indicate large biases ranging between 18 and 90 mm for summer season, which are considered to be caused by a significant variability of water vapor. We also compared PPP processed position solution using KARAT with that using the latest mapping function for the two week GEONET data sets. The KARAT solution were almost identical to the solution using GMF with linear gradient model, but some cases were slightly worse under the extreme atmospheric condition. Though we need further investigations to evaluate the capability of KARAT to reduce atmospheric path delays under the various topographic and meteorological regimes, the KARAT will be the powerful tool to reduce atmospheric path delay with the numerical weather model improvement.

1. はじめに

地球中性大気による見かけ上のマイクロ波の経路長の伸び、すなわち伝搬遅延誤差 (Atmospheric Path Delay/以後これを“大気遅延”と呼ぶ) は、天頂方向で 2.3-2.8m にも及び、これは時刻精度に換算すると 10^{-9} 秒の桁に達する大きさである。中性大気遅延は、静水圧平衡が仮定できる大気成

分^(注1)に起因する遅延量 (これを“静水圧遅延量”と呼ぶ) が 80 – 90%、及び水蒸気に起因する遅延 (これを“湿潤遅延量”と呼ぶ) が残りを占める。従来の研究で良く知られているように、静水圧遅延量が地上気圧によるモデル推定によりミリの精度で補正可能である一方、天頂方向で数 cm-40cm と激しく変動する湿潤遅延量はほとんどモデルでの予測不可能と

(注1): 主に水蒸気を除く酸素、窒素などで構成される乾燥大気成分

される (大気遅延の詳細については一昨年の我々の宇科連講演論文を参照されたい[1])。

GPS、GLONASS、Galileo、あるいは準天頂衛星システムなどの衛星航法システム (GNSS: Global Satellite Navigation System) や、地球姿勢変動観測や宇宙飛翔体の軌道決定に用いられる VLBI 技術は、人工衛星や銀河系外の電波天体から発射されるマイクロ波を地上の受信機で受けて計測する。これらの宇宙測地計測技術では、衛星から地上局までの電波の伝搬時間、あるいは地上の2地点間での伝搬時間差が基本的な測定量となる。ここで必要とされる時刻計測精度は少なくとも 10^{-12} 秒以上に達し、前述の大気遅延はこれに対して2~3桁も大きな誤差要因である。

一昨年、及び昨年の宇科連講演会において、我々は気象学の分野で天気予報に用いられる数値天気予報データを用いた大気遅延推定手法の開発について紹介した [1], [2]。特に、昨年の講演では、Hobiger ら [3], [4] によって開発された高速・高精度の大気遅延計算ツール “KARAT” (KAshima RAytracing Tools) を紹介し、これを用いて遅延量によって生じる GNSS 測位誤差をシミュレーションした結果を報告した。KARAT は、気温、気圧、水蒸気分圧といった各気象要素の変動に応じて電波の伝搬経路を計算でき、現実の大気に即した遅延量計算が可能である。今回は、国土地理院 GPS 観測網 (GEONET/GPS Earth Observation Network System) から得られた GPS データから、KARAT によって推定された大気遅延を差し引いて測位解析を行い、その除去効果を調べた。具体的には、KARAT 推定により得られた測位解析結果と、従来の大気モデルを用いた場合の測位解析結果とを比較することで評価した。

2. KARAT とマッピング関数

2.1 KARAT

2008 年 8 月現在、気象庁は気象業務支援センターを通じて、実際の天気予報に用いる複数種類の数値天気予報データを提供している (数値予報データの詳細については [1] を参照されたい)。我々は、これらのうち、格子間隔約 10km、経度方向に 361、緯度方向に 289 個の格子点を持つメソスケール客観解析データ (MANAL/Meso-scale analysis data) を用いて波線追跡法により視線方向の大気遅延を計算するツール “KARAT” を開発した。KARAT の詳細について別の文献に譲るが [3], [4]、元の数値予報データの各計算格子に与えられる温度、気圧 (正確には等気圧面高度)、水蒸気分圧の値から、等経緯度間隔の格子網での値を内挿で求め、数値予報データを再構築して解析計算が可能になり高速化が実現した。この計算アルゴリズムの改良により、クロック周波数 2.4GHz の Core2Duo CPU 計算機で 1 秒間に約 1500 パスの遅延量計算ができる。なお、MANAL データは、2006 年 4 月以降 3 時間毎の出力がなされ、これが現時点での時間分

解能となるが、実際の GPS 解析では 30 秒ないしはそれより短時間でのデータ取得を行うことから、KARAT にはスプライン補完で簡便に時間補完する機能も付加し、任意の時刻での遅延量計算も可能である。また、MANAL データは鉛直方向には 10hPa 面 (高度約 36km) までしかデータがないが、これより上層はほぼ静水圧平衡が保たれているため標準大気モデルに基づいて計算を行っている。

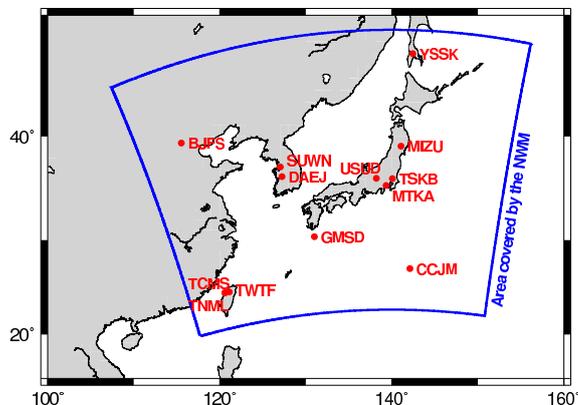


図1 KARAT で大気遅延計算が可能な領域。青枠は実際の MANAL データの解析領域を示す。なお、赤丸で示したのは IGS 観測点の位置で、これらの場所での KARAT による視線遅延とマッピング関数で計算した視線遅延とを比較した。

2.2 マッピング関数

マッピング関数 (mapping function) とは、天頂方向の大気遅延 (天頂遅延) に対して電波源の方向に投影して得られる視線方向の大気遅延が何倍の値に相当するかを、仰角を変数として関係づけた関数を言う^(注2) [5] ~ [9]。実際の VLBI や GNSS のデータ解析では、これを様々な方位仰角各々についての偏微分係数として最小自乗法により天頂遅延量を推定する。この推定法は、これまで標準的な大気遅延除去法として、VLBI や GNSS 解析で利用されてきた。マッピング関数を用いると、ある仰角 θ の全遅延量 ΔL は下記のように簡単に表すことができる。

$$\Delta L = \Delta L_h^z M_h(\theta) + \Delta L_w^z M_w(\theta), \quad (1)$$

ここで、 ΔL_h^z と ΔL_w^z は、それぞれ天頂方向の静水圧遅延量と湿潤遅延量である。これらに乘じられている $M_h(\theta)$ と $M_w(\theta)$ がマッピング関数である。マッピング関数は、第一近似としては $\sin(\theta)$ の逆数を基本形として表現する。さらに、地球の曲率や、大気モデルなども考慮したマッピング関数ではより複雑な連分数形式で表す (例えば [6], [7])。

GNSS 測位解析での鉛直測位誤差軽減や、VLBI のように長時間双方での可視域確保が必要な大陸間観測では、仰角 5 度、ないしは 3 度といった低仰角観測を行う。このとき、大

(注2): 仰角依存関数とも言う

気下層に偏在する水蒸気の水平変動の影響が特に顕著となる。そこで、最近では大気水平変動をモデル化したマッピング関数（これを“方位依存マッピング関数”、あるいは“異方性マッピング関数”と呼ぶ）が実用に供されている [10] [11]。異方性マッピング関数では、大気構造の水平変動を単純な一次平面の勾配で仮定する。例えば、Chen and Herring [11] による異方性マッピング関数を例にとると、

$$\Delta L = \Delta L_h^z M_h(\theta) + \Delta L_w^z M_w(\theta) + L_{ns} m_{az}(\theta) \cos \alpha + L_{ew} m_{az}(\theta) \sin \alpha \quad (2)$$

となる。ここで、右辺の第一項と第二項は式 (1) と同じもの、第3項の L_{ns} と第4項の L_{ew} はそれぞれ大気勾配を表現するベクトルの南北方向、及び東西方向の各成分である。また、 α が電波源の方位であり、 $m_{az}(\theta) \cos \alpha$ と $m_{az}(\theta) \sin \alpha$ が、それぞれ異方性マッピング関数の南北、及び東西の各成分となる。ここで、 $m_{az}(\theta)$ は、

$$m_{az}(\theta) = \frac{1}{\sin \theta \tan \theta + C} \quad (3)$$

で表される。ここで、“ C ” は常数であり、Chen and Herring は VLBI 解析の結果から “ $C = 0.0032$ ” としている [11]。実際の解析では、観測方程式の未知パラメータとして、天頂遅延量に加え L_{ns} と L_{ew} の2つを加えて推定することになる。

2.3 数値天気予報データに基づくマッピング関数

“KARAT” の項で説明した数値天気予報データは、マッピング関数構築にも利用されている。ここ 10 年の間に開発され、実際の GNSS や VLBI のデータ解析に使用されている、Isobaric Mapping Function (IMF) [7]、Global Mapping Function (GMF) [9]、あるいは Vienna Mapping Function (VMF) [8] などがそれである。これらは、大気構造の時間変化に応じて動的にマッピング関数を求め、より精度の高い天頂遅延量推定を目指したものである。

2001 年に Niell が発表した IMF では、NCEP(National Centers for Environmental Prediction/米国国立環境予報センター) が提供する数値予報モデルを用い、同データの 200hPa 指定気圧面高度^(注3)を入力パラメータとしてマッピング関数を計算する。2004 年に発表された VMF では、ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts/ヨーロッパ中期気象予報センター) が毎日 6 時

(注3): 静水圧平衡を仮定すれば気圧と高度は等価なので、気象学では、任意の地点の気圧値をしばしば一定の気圧値 (“指定気圧” という) が示す高度で表現する。ただし、ここで使用する高度は “幾何学的な高度” ではなく、上空にいくにしたがって重力加速度が減少する影響を加味した “ジオポテンシャル高度” と呼ばれる値である。

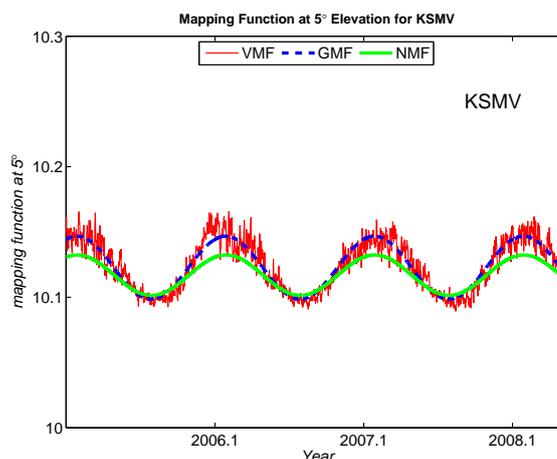


図 2 IGS 観測点 KSMV(NICT 鹿島宇宙技術センター) における各マッピング関数の時間変化 (2005 年 1 月 ~ 2008 年 6 月)。赤い実線が VMF、青い波線が GMF、及び緑の実線が NMF をそれぞれ示す。これらは仰角 5 度での値である。

間毎に提供する全球数値予報モデルを用い、静水圧遅延量の時間変化を考慮してマッピング関数の各係数を動的に逐次変化させる。さらに Boehm らは、VMF の簡易版とも言うべき GMF [9] を 2006 年に発表した。GMF では、ECMWF データを用いて平均的な大気構造を求め、これにより各係数を決定する。その分精度は多少低下するが、比較的簡便に数値予報データ利用の利点を生かした補正が可能である。

図 2 はこれらのマッピング関数の特徴を示した図で、IGS 観測点 KSMV(NICT 鹿島宇宙技術センター) における仰角 5 度での各マッピング関数の 2005 年から 2008 年 6 月までの時系列がプロットされている。

まず、緑色の実線で示した NMF は、緯度依存性と季節変化のみを考慮したマッピング関数である。わざわざ観測点近傍の気象データを取得することなく計算可能なため、現在でも多くの GPS・VLBI 解析ソフトウェアで使用されている。赤い実線は 6 時間毎の ECMWF データより計算で求めた VMF の時系列を示し、より短周期の変動が表現されている。青い破線の GMF は、いわば VMF にローパスフィルタをかけて長周期成分のみを取り出した形なので、これを反映して大局的には VMF と一致する。これまでの評価では、NMF と VMF・GMF との間に、この図で冬季に示されるように 0.015 にも及ぶ系統差が生じることがわかっている。この差は、測位解の鉛直成分に換算すると 15mm に達し、無視できない大きさである。

一方、GMF と VMF は汎地球的規模で適用可能とされている。これを確かめるために、東アジア域に展開する IGS(International GNSS Service) 観測点 16 点 (図 1 参照) を選び、各点でのマッピング関数と KARAT からそれぞれ得られる仰角 5 度での視線遅延量の差を求め、これらの平均

表 1 東アジア周辺の 16 カ所の IGS 観測点 (図 1 参照) における仰角 5 度での KARAT 視線遅延と各マッピング関数で計算した視線遅延との差の平均と標準偏差。単位は mm。

IGS station	VMF-KARAT	GMF-KARAT	NMF-KARAT
YSSK(Rusia)	-8.3±18.7	-10.8±30.6	-14.1±32.3
MIZU(Mizusawa, Japan)	16.1±43.6	21.9±50.1	31.3±51.0
TSKB(Tsukuba, Japan)	12.3±48.8	22.6±52.7	38.4±53.4
KSMV(Kashima, Japan)	8.9±45.0	19.0±49.6	34.7±50.2
KGNI(Koganei, Japan)	20.7±44.9	27.3±49.7	43.7±50.1
MTKA(Mitaka, Japan)	17.9±44.1	25.4±48.4	41.9±48.8
USUD(Usuda, Japan)	56.9±32.1	1.6±35.1	12.1±35.5
BJFS(China)	13.6±37.7	14.6±42.4	24.8±42.9
DAEJ(Korea)	16.4±64.6	18.9±68.7	36.5±69.7
SUWN(Korea)	-0.6±54.0	4.0±59.4	20.0±59.3
AIRA(Aira, Japan)	-78.5±65.4	-93.9±63.1	-82.1±63.0
GMSD(Tanegashima, Japan)	6.5±50.2	0.5±53.4	25.2±54.9
CCJM(Chichijima, Japan)	15.8±65.0	2.5±66.0	28.4±66.7
TWTF(Taiwan)	21.5±79.7	5.3±80.0	42.5±81.4
TCMS(Taiwan)	63.5±93.3	53.8±92.9	92.9±94.1
TNML(Taiwan)	63.5±93.3	53.9±92.9	93.0±94.1

と標準偏差を計算して表 1 にまとめた。この計算では、2007 年 6 月から 9 月までの 3ヶ月間のデータを用いた。ここで、MANAL データはほぼ実際の気象条件を表現するデータとみなせるので、KARAT を用いて計算した視線遅延量を真の値とみなせば、表に示される平均値の大きさは各マッピング関数の実際の大気モデルからのずれを意味する。また、いずれのマッピング関数も、等方の大気構造を仮定するため、表にある標準偏差の大きさは、大気構造の水平変動 (特に水蒸気の影響) の影響とみなすことができる。

表 1 によれば、例えば VMF を用いたとしても 10mm に及ぶ系統誤差がいずれの観測点でも認められる。さらに、標準偏差は 18-90mm にも及び、大気構造の水平変動の影響が顕著であることを示唆する。これらの結果から、少なくとも東アジア域でのマッピング関数の有効性に疑問符が付くが、最終的な結論を出すために季節変化や様々な気象条件下での同様に調べる必要がある。

3. 解 析

先に説明した各マッピング関数による大気遅延補正に対して、KARAT の補正効果がどの程度になるか評価するために、国土地理院 GPS 観測網 GEONET のデータを用いて実際に測地解析を行った。GEONET は全国約 1300 箇所に設置された電子基準点で構成される世界でも類をみない高密度 GPS 観測網であり、各観測点には 2 周波タイプの測地受信機が設置されている。各観測点で得られたデータは毎日つくば市にある国土地理院に伝送され、測地座標系の高精度維持や地震前後の断層運動解明、あるいは定常的な地殻変動計測等に利用されている。このデータは、国土地理院が設置する匿名 ftp サーバから誰でもインターネット経由で取得可能で

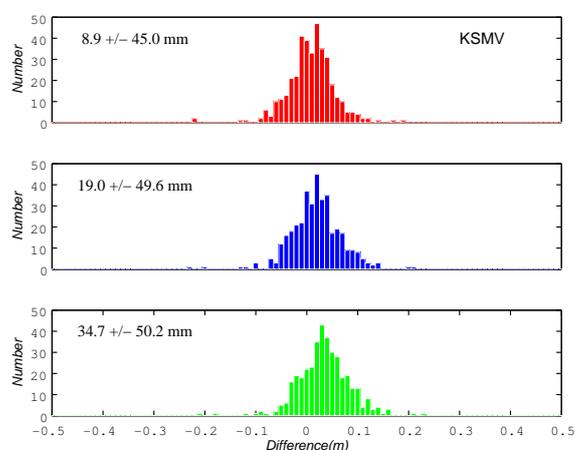


図 3 2007 年 6 月~9 月のデータから計算した仰角 5 度での視線遅延量差のヒストグラム。最上段が KARAT 視線遅延量と VMF 視線遅延量との差、中段が KARAT と GMF との差、下段が KARAT と NMF との差を示す。

ある。

2007 年 7 月 9-23 日の 2 週間にわたる GEONET 全点のデータ、国際測位衛星サービス (IGS: International GNSS Service) から提供される GPS 衛星の精密軌道情報、及び各衛星毎のクロックオフセット情報を入手し、観測点毎、かつ 1 日毎の三次元位置を PPP (高精度単独測位/Precise Point Positioning) 解析により求めた。この解析では、Takasu and Kasai による GPS 解析ソフトウェア “GPSTools [12]” を用いた。ここでは、(1)KARAT により推定した大気遅延を位相に換算し、これを前もって除去した RINEX データ^(注4)に

(注4): The Receiver Independent Exchange Format/受信機に依存し

より解析、(2) 大気遅延推定に GMF と勾配マッピング関数を用いて通常の RINEX データを解析、(3) 大気遅延推定に GMF のみを用いて通常の RINEX データを解析、の 3 通りの計算を行って、それぞれ出力される三次元測位解の短期再現性で評価を試みた。

4. 結 果

異なるマッピング関数を用いて PPP 解析を行った場合、最も顕著にその影響が見られるのは測位解の鉛直成分である。図 4 では、前項で示した 3 通りの解析法について、2 週間分の測位解の標準偏差を地図上で表現している。この図で、暖色系の色で示される観測点ほど鉛直成分の短期再現性が悪いことを意味する。先に説明した (1) - (3) のいずれも大局的な再現性の空間分布は似ており、いずれも九州や四国で 10mm を越える値が示されている。ただし、同じく西日本での分布を見ると、(2) の GMF と勾配マッピング関数を用いた場合の結果がやや寒色系の色を示す観測点が多い。さらに、全観測点の測位解の個々の成分について、短期再現性の頻度分布を示したのが図 5 である。この図からは明らかに、(1) の KARAT による鉛直成分の再現性は $3.4 \pm 4.1\text{mm}$ と求められ、(3) の $4.4 \pm 4.9\text{mm}$ よりは顕著に向上するものの、(2) では $2.7 \pm 3.5\text{mm}$ であり、KARAT による結果に勝る。

Hobiger らによる 4ヶ月にわたる東アジア域の IGS 観測点データを用いた解析結果 [3] によれば、KARAT 適用での測位解再現性が GMF+勾配マッピング関数によるものと遜色ないか、10 - 12% 程度良くなることが示され、KARAT の優位性を結論付けている。一方、我々が解析に選んだ期間中、九州から四国にかけての西日本では、梅雨前線と台風 4 号の影響で集中豪雨に見舞われ、場所によっては 1 日で 500 - 1100mm にも及ぶ降水量を観測した。MANAL データの時間分解能は 3 時間にすぎないが、集中豪雨をもたらす積乱雲の発達から消長までは 1 時間程度以下であるため、KARAT による補正効果が充分ではなかったことが考えられる。これに対し、測位解の水平成分についてみると、勾配マッピング関数を使わなかった (3) の結果に比べた場合の (1) の KARAT の結果の優位性がわずかながら確認できた。今後、より確かな評価のため、より長期間にわたる同様の比較を行う必要がある。

数値天気予報データを用いる KARAT の最大の利点は、予報モデルの精度が向上すれば、自動的に KARAT による大気遅延精度も上がることにある。また、良くなったモデルにより、過去に遡って改めて数値天気予報データを生成することも可能で、これにより過去の GPS データの再評価もできる。現段階で、KARAT はマッピング関数による大気遅延補正とほぼ肩を並べるレベルに達したと考えられるが、GNSS

や VLBI 解析で推定すべき未知パラメータを減らす効果ともあいまって今後有効な大気遅延除去法となると期待できる。

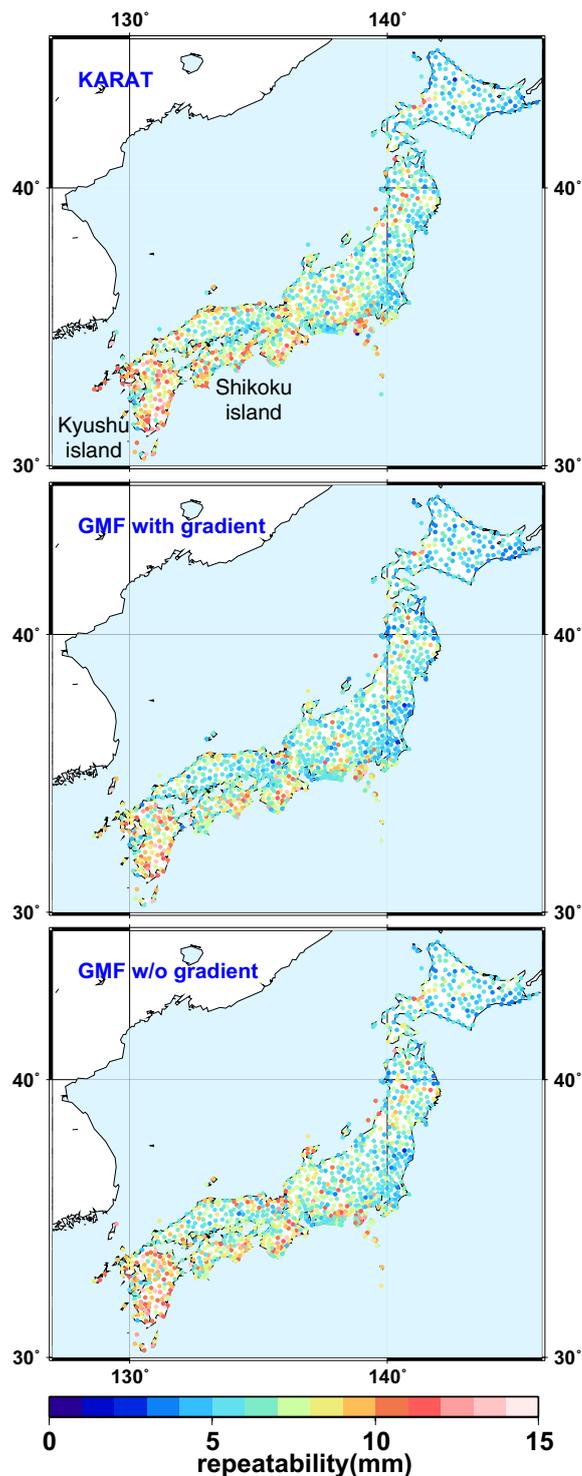


図 4 2007 年 7 月 9 ~ 23 日の GEONET データから得られた測位解鉛直成分の短期再現性。最上段は KARAT による結果、中段は GMF と勾配マッピング関数を用いた場合、下段は GMF のみを用いた場合を示す。

ない GPS データの形式。テキストファイルになっている

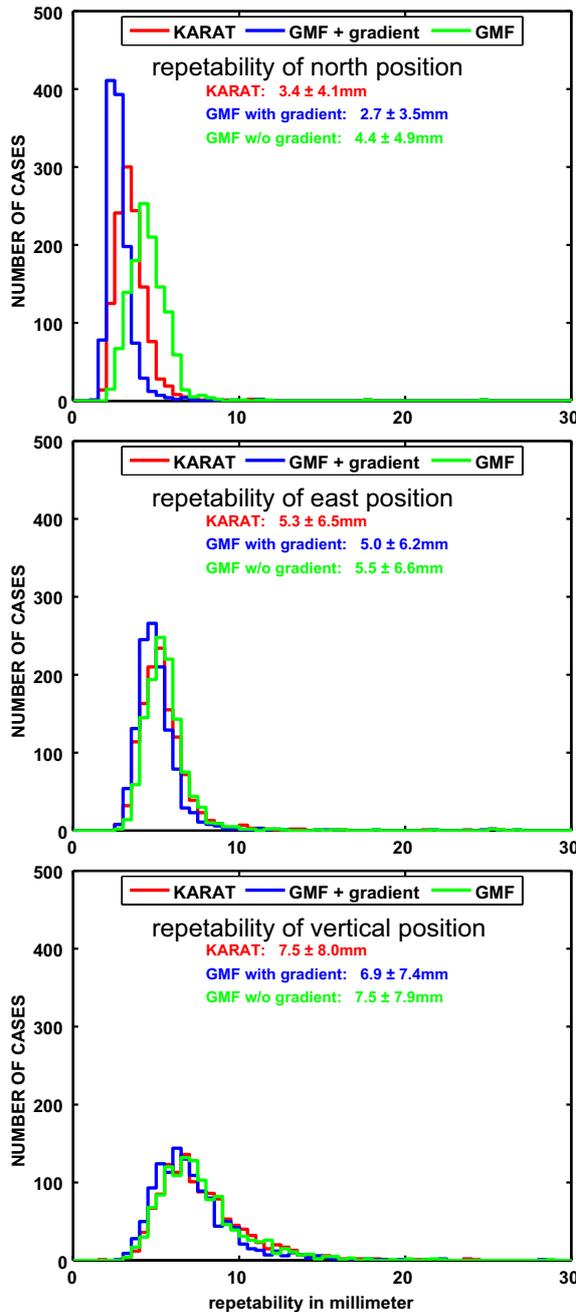


図5 図4と同様に計算した短期再現性の三成分をそれぞれヒストグラムで示した図(上から南北、東西、鉛直)。

5. まとめ

Hobigerらの手法[3],[4]により改良、かつ高速化された波線追跡アルゴリズムにより、気象庁メソスケール客観解析データに基づく大気遅延を計算するツール“KARAT”を用い、従来のGNSSやVLBI解析で使用される大気モデル(マッピング関数)を評価した。まず、マッピング関数とKARATとの比較では、求められる視線遅延量に18-90mmにも及ぶ系統的な差が見られることがわかった。また、国土地理院GPS

観測網GEONETから得られる全国約1300点の観測データ2週間分を用いて、PPP解析を行い1日毎の測位解の短期再現性を指標としてKARATとマッピング関数を比較した。特に鉛直成分での比較で、GMF[9]に勾配マッピング関数を組み合わせた場合の結果が最も再現性が良く、KARATはこれに続き、GMFのみを用いた結果が最も悪かった。ただし、この解析期間中は、集中豪雨や台風の影響が顕著であり、MANALデータの時空分解能では大気遅延推定精度が充分ではなかった可能性がある。一方、水平成分について見ると、GMFのみを用いた場合よりKARAT解析での再現性が良く、大気構造の水平変動を効果的に除去できていると言える。今後より長期にわたる同様のデータ解析により、さらに詳細な評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 市川隆一、関戸衛、小山泰弘、数値天気予報データを用いた大気伝搬遅延量推定ツールの開発、第50回宇宙科学技術連合講演会講演論文集1D15、2006。
- [2] 市川隆一、トーマス ホビガー、瀧口博士、小山泰弘、近藤哲朗、高速波線追跡ツールKARATによる大気遅延推定モデルの定量的評価、第51回宇宙科学技術連合講演会講演論文集3D02、2007。
- [3] Hobiger, T., Ichikawa R., Takasu T., Koyama Y., and Kondo T., Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning, *Earth Planets Space*, 60, e1-e4, 2008a.
- [4] Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama and T. Kondo, Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010503, 2008b.
- [5] Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 20, 1593-1607, 1985,
- [6] Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 101, 3227-3246, 1996
- [7] Niell, A. E., A. J. Coster, F. S. Solheim, V. B. Mendes, P. C. Toor, R. B. Langley, and C. A. Upham, Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radionsonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 830-850, 2001.
- [8] Boehm, J. and H. Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.
- [9] Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304, 2006.
- [10] MacMillan, D.S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1041-1044, 1995.
- [11] Chen, G. and T. A. Herring, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102, 20489-20502, 1997.
- [12] Takasu, T. and S. Kasai, Evaluation of GPS Precise Point Positioning (PPP) Accuracy, *IEIC Technical Report*, 105(208), 40-45, 2005.