

最新の数値予報データを用いた大気伝搬遅延量推定ツールの開発 -序報-

市川隆一(情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター)

A Software Package Development for Estimating Atmospheric Path Delay based on JMA Numerical Weather Prediction Model

Ryuichi ICHIKAWA (KASHIMA SPACE RESEARCH CENTER, NICT)

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

Abstract

Space geodetic positioning systems based on microwave signals, such as the Global Navigation Satellite System (GNSS) and Very Long Baseline Interferometry (VLBI), need to carefully model or cancel the atmospheric path delays in order that these propagation effects do not undermine positioning accuracy. Recently, the development of atmospheric model based on data from numerical weather prediction models have progressed to remove the delays. To apply such atmospheric model for the real correction around Asia monsoon region we have to take account for the highly variable mesoscale disturbances. We have started the development of the software package for estimating the path delays by ray tracing through the output fields of a numerical weather prediction model by Japan Meteorological Agency (JMA). In this paper we describe the preliminary results using the package.

1. はじめに

GPS、GLONASS、あるいは Galileo などの全地球衛星航法システム (GNSS: Global Satellite Navigation System) や我が国が開発を進めている準天頂衛星システムなどでは、人工衛星から発射される信号を地球上の受信機で受信して測位を行う。また、数 1000km に及ぶ距離をミリ精度で計測可能な VLBI でも、銀河系外の電波星から到来する電波を複数の電波望遠鏡で受信し、そのデータからアンテナ間での時間差を求める。これらのマイクロ波を用いる宇宙測地計測技術では、いずれも地球大気の底でデータ取得するために、電磁波の速度が大気中では真空中より減速するために生じる大気遅延 (*Atmospheric Path Delay*) の影響がデータに含まれてしまう。

特に、ミリの精度が要求される GNSS による地殻変動計測、衛星軌道決定や標準時の高精度維持に不可欠な VLBI による地球姿勢モニター、あるいは惑星探査機の軌道決定など精密測地の分野では、この大気遅延は深刻な誤差要因の一つ

である [1]。

気象学分野で天気予報に用いられる数値予報^(注1)データを用いて、大気遅延の除去を目的としたモデル構築をはかる研究が最近進み、欧米の研究では GNSS や VLBI の観測結果の精度向上に寄与することが確かめられつつある [2], [3]。これらの研究で使用される気象データは、EU あるいは米国の気象機関で算出されているものであり、我が国を含む東南アジア地域では必ずしも効果的なモデルになっていない可能性がある。この最大の要因は、モンスーン地域という世界でも有数の湿潤地域で、時間的にも空間的にも大気変動が顕著なことにある。

一方、我が国の気象庁が定期的に算出する数値予報データがここ 2、3 年ほど前よりネットで公開されるようになった。このデータはアジア周辺の大気変動をよく再現出来ると考えられ、同データを用いて大気遅延のモデル化を行えば、我が国周辺での観測精度向上への寄与が期待できる。そこで我々

(注1): 英語では “numerical weather prediction” で、正確には “数値天気予報” となるが、気象学では単に数値予報と通常呼ぶ

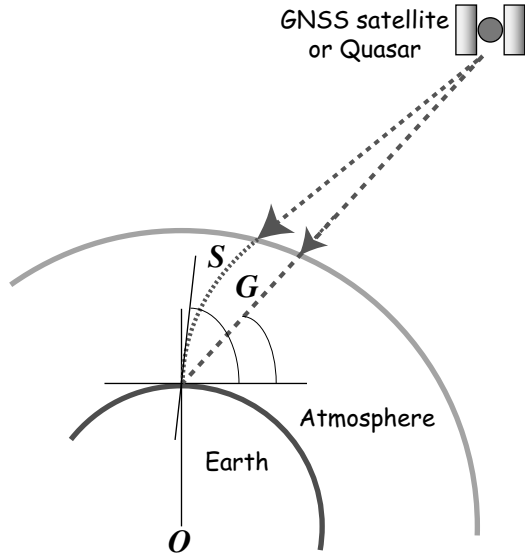


図 1 大気屈折の模式図

は、このデータを用いて大気遅延を計算するプログラムの開発に着手した。かつて、同様のプログラム試作を開発段階の気象庁データに対して行ったが[4]、今回はより汎用性を高め、最新の気象データに対応することを開発の主眼に置いている。本報告では、大気遅延の原理と数値予報データについて概説し、遅延量計算プログラムの開発方針について述べる。

2. 大気遅延誤差とその推定モデル

2.1 大気遅延の基本原則

大気屈折による大気遅延は2つの物理的効果に起因する。1つは、マイクロ波が誘電媒質である大気中を通過するために真空中よりも減速され、見かけ上伝搬経路が伸びる効果である。2つめは、マイクロ波の伝搬経路が曲率 (*ray bending*) を持つため、直線より経路が実際に長くなる効果である。このとき、大気の大気密度は下層ほど大きいので、図1の大気屈折の模式図に示した S のように上方に凸の伝搬経路となる。これらの効果による遅延 ΔL は次式で表される。

$$\Delta L = \int_L [n(s) - 1] ds + [S - G] \quad (1)$$

ここで、 G は GPS 衛星・クエーサーなどの電波源から地上のアンテナまでの直線距離、 $n(s)$ は大気屈折によって曲率が生じた伝搬経路 L 上の点 s における屈折率である。このとき、 S は L 上の微少部分 ds を積分して得られる。右辺第1項が減速の効果であり、実際の電波は L 上を大気中の伝搬速度 c_{atm} で伝搬するが、解析の上では真空中の速度 c で伝搬したとみなされる。したがって、見かけ上伝搬経路が伸びたことになる。そして、残りの右辺第2項が伝搬経路の曲率の効果となり、当然の事ながらこの効果による遅延は天頂方向で0となる。この曲率の効果は、仰角15度以上では1cm以下

下の経路長の伸びに相当するに過ぎないが、これよりも低仰角では急激に増大する。一方、減速の効果は曲率の効果に比べて3桁程度大きく、仰角15度では約10mにも達する。

さて、湿潤大気の大気屈折率は以下の式で与えられる[5]。

$$(n - 1) \times 10^6 = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) + K_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) + K_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) \quad (2)$$

ここで、 P_d 、 P_v 及び T はそれぞれ乾燥大気分圧 (hPa)、水蒸気分圧 (hPa)、及び絶対温度 (K) である。各項の係数 K_1 、 K_2 及び K_3 は室内実験より決定される定数である[6][5]。式(2)の右辺第1項と第2項は、各々乾燥大気成分と水蒸気の誘導双極子の効果である。そして第3項が水蒸気分子がもともと分極していることに起因する永久双極子の効果である。電波伝搬の分野では、一般に式(2)の右辺を以下のように整理してそれぞれの効果に分けて記述する。

$$(n - 1) \times 10^6 = K_1 \left(\frac{P}{T} \right) + K'_2 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) \quad (3)$$

$$K'_2 = (K_2 - mK_1)T + K_3 \quad (4)$$

ここで、式(4)の P は全大気圧 (hPa)、また式(4)の m は水蒸気分子の分子量と乾燥大気成分の平均分子量の比である。式(4)の T は温度の鉛直プロファイルから与えられるべきものである。ただし、実際には式(4)全体に対するこの項の寄与が小さいことから、温度鉛直プロファイルを加重平均した“mean temperature T_m ”を、

$$T_m = \left[\int \left(\frac{P_v}{T} \right) dz \right] / \left[\int \left(\frac{P_v}{T^2} \right) dz \right] \quad (5)$$

と定義して T の代わりとする[7]。なお、式(5)の T_m は、地上気温とほぼ比例関係にあることが確かめられている[8]。

Davisら[7]は、過去の研究[5]、[6]で示された式(2)の各係数 K_1 、 K_2 、及び K_3 を整理し、大気屈折率の算出式を、

$$\begin{aligned} N &= (n - 1) \times 10^6 \\ &= 77.6 \times \left(\frac{P}{T} \right) + 3.82 \times 10^5 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

として与えている。

大気屈折率を示す計算式(4)の第1項を静水圧平衡にある湿潤大気成分の密度に比例する寄与であることから、“静水圧項 (*hydrostatic term*)”と呼び、これを積分して得られる遅延量を“静水圧遅延量 (*hydrostatic delay*)”と呼ぶ。式(4)の第2項は、物理的にはある密度で存在する水蒸気分子の分極の効果が絶対温度に反比例して小さくなることを示し“湿潤項 (*wet term*)”と呼ぶ。この水蒸気の大気屈折率を反映している項を積分して得られる遅延量を“湿潤遅延量 (*wet delay*)”と呼ぶ。特に、天頂方向に屈折率を積分することで得られる遅延量については、“天頂遅延量 (*zenith delay*)”と呼び、静水圧項、湿潤項、及び先の2項の合計である全大気屈折率をそれぞれ地表から大気上層まで天頂方向に積分して得られる遅延量については、各々“天頂静水圧遅延量 (*zenith hydrostatic*

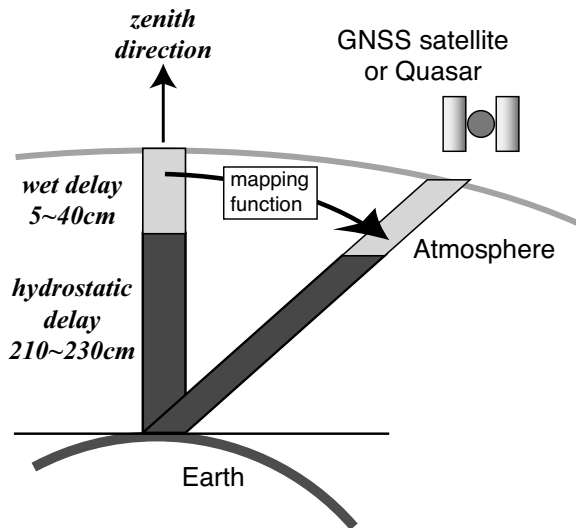


図2 マッピング関数の模式図

delay/ZHD)、“天頂湿潤遅延量 (zenith wet delay/ZWD)”、“天頂全遅延量 (zenith total delay/ZTD)” という用語をしばしば使用する。

2.2 マッピング関数

正確な大気遅延を得るためには、受信機のアンテナから地球上の電波源を見た高度角及び方位角によって一意に決まる伝搬経路上の気温・気圧・水蒸気分圧の値から大気屈折率を計算し、これを積分する必要がある。これらの値は時々刻々と変化し、場所によっても変動するため、大気遅延は時間・空間の双方の関数となる。実際の GNSS や VLBI の解析では、このままで大気遅延を取り扱うには未知数が極めて多くなり、観測方程式を解くことは事実上不可能となる。

ある一定の時間内において大気が水平方向にはほぼ一様な構造を維持するとすれば、遅延量は仰角のみに依存する関数となり、未知数を大幅に減らすことができる。宇宙測地学では、この仰角依存関数を“マッピング関数 (mapping function)”と呼ぶ。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。

$$\Delta L = \Delta L_h^z M_h(\theta) + \Delta L_w^z M_w(\theta), \quad (7)$$

ここで、 ΔL_h^z と ΔL_w^z は、それぞれ先に述べた ZHD、及び ZWD 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。図 2 はマッピング関数の模式図である。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されるが、地球の曲率や、大気モデルなども考慮して様々な形のマッピング関数が提唱され、使用されている。代表的なマッピング関数は次のような連分数形式でしばしば表される [9]。

$$m(\theta) = \frac{1}{\sin \theta + \frac{a}{\sin \theta + \frac{b}{\sin \theta + \frac{c}{\sin \theta + \dots}}} \quad (8)$$

ここで、 θ は電波源の真の仰角、 a 、 b 、及び c はそれぞれマッピング関数のパラメータであり、定数、ないしは温度、水蒸気分圧などの関数である。

これまでに GNSS や VLBI の観測データに含まれる大気遅延除去には、球対称の多層構造を仮定した大気モデルが主に使用されてきた。一方、最近では、主に鉛直測位成分の精度向上を目的として低仰角観測を積極的に GNSS や VLBI 観測のスケジュールに組み込むようになっている。例えば、我が国に約 1300 箇所の電子基準点を展開する国土地理院の GPS 連続観測システム (GEONET: GPS Earth Observation Network System) では観測の最低仰角を 5 度としている。

低仰角観測を実施する場合、大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、大気の水蒸気変動をモデル化し、方位をも変数とするマッピング関数(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)が開発され、実用に供されてきた [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ことが多い。

3. 数値予報データと遅延量推定への応用

3.1 数値予報データ

気象学の分野において、現代の天気予報はすべて数値予報により行われている。数値予報とは、物理方程式に基づいて風、気温、気圧、湿度などの数式化したモデルにより、これ

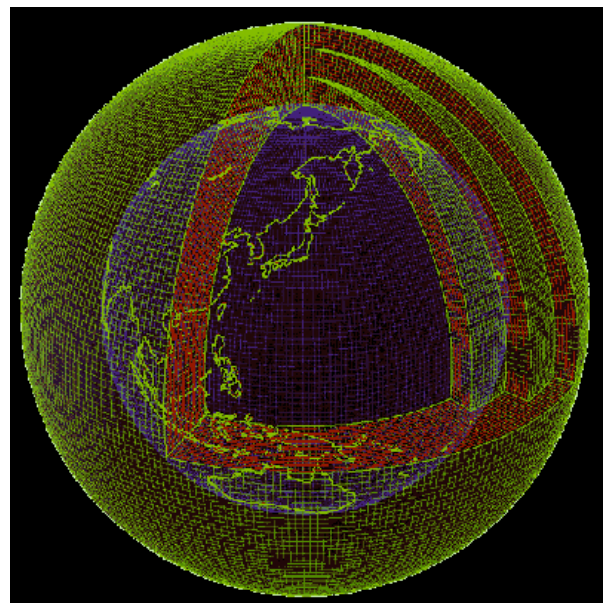


図3 気象庁数値予報モデルの計算格子の概念図 [15]

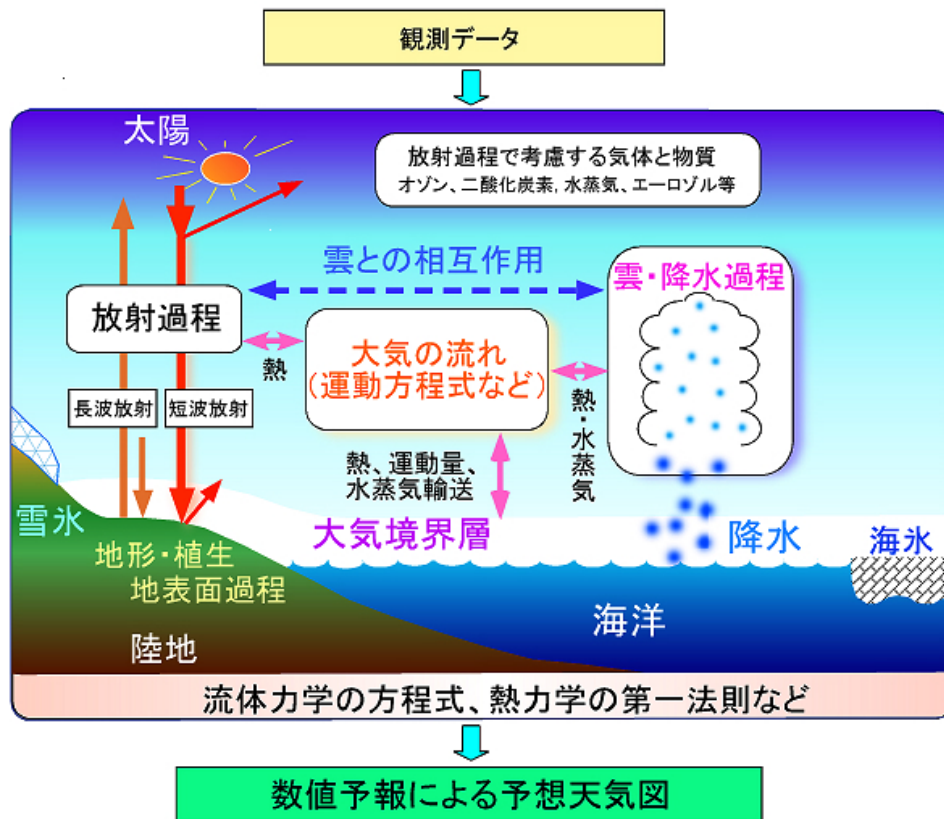


図 4 気象庁数値予報モデルで考慮されている様々な物理過程 [15]

らの時間的、及び空間的变化をスーパーコンピュータを用いて将来の大気の状態を計算する方法である。具体的には、計算機で大気の状態を解析するために、図 3 に示したような規則正しく並んだ格子で大気を細かく分割し、それぞれの格子点での気象要素 (風向、風速、気温、気圧、湿度) の値を全世界で同時に観測されるデータから求める。この計算プロセスを“客観解析 (*analysis*)”、算出されるデータを“客観解析データ (*analysis data*)”と呼ぶ。この客観解析データを初期値として、将来の大気の状態を計算で予測する (図 4 に実際にモデルに組み込まれる物理過程を示す)。この計算で用いられるソフトウェアを“数値予報モデル (*NWM: numerical weather model*)”と呼ぶ。本論では、数値予報モデルの計算結果と客観解析データを合わせた総称として“数値予報データ”の語を使用する。

3.2 数値予報データによるマッピング関数推定

ここ数年、数値予報モデルを用いて大気構造の時間変化に応じて異方性マッピング関数を動的に逐次計算して GNSS 観測や VLBI 観測の大気遅延除去に応用する手法が主に欧米の研究者を中心に研究されている [2], [3], [12]。しかしながら、これらのモデルで考慮されているのは静水圧遅延量の水平変動の効果のみであり、変動の激しい水蒸気についてはまだ現行のマッピング関数には組み込まれていない。また、我が国を含むアジアモンスーン地域でしばしば生じるメソスケール

現象^(注2)はこの水蒸気変動の最たるものであるが、これらを考慮したマッピング関数の開発はまだ不十分である。

3.3 気象庁数値予報データによる大気遅延推定

かつて筆者らは、気象庁が当時開発していた 10km 空間分解能の数値予報データ (気象庁 10km 格子地域モデルデータ) を用いて大気遅延量の計算ソフトウェアを試作した [4]。この試作ソフトウェアは大気中での電波の伝搬経路上において数値予報データから大気屈折率を逐次計算する波線追跡法により、任意の方位・仰角での大気遅延量を計算する機能を持つ。これを用いて、GNSS 観測や VLBI 観測で使用するマッピング関数の性能評価を行った。図 5 は、同ソフトウェアにより計算した天頂方向の湿潤遅延量マップと水蒸気空間分布の勾配をベクトルで示した例である。残念ながら、このときは使用できるデータが 1 日分のみであったため、充分な数の解析事例を吟味するには至らなかった。

その後、我が国の気象庁では、2007 年 1 月現在で表 1 に示す 3 種類の客観解析データ、及び表 2 に示す 6 種類の数値予報モデルが実用に供されるようになった [13], [14]。中でも、メソモデルは格子間隔 5km という極めて高分解能のモデル

(注 2): 気象学の用語で時間スケールで数分～数日、空間スケールで 2km～2000km の範囲で変動する現象を言う。具体的な例としては、台風やその周辺の降雨帯、積雲対流、集中豪雨、竜巻、あるいはダウンバーストなどの激しい降雨、降雪をとまなうものをいう。

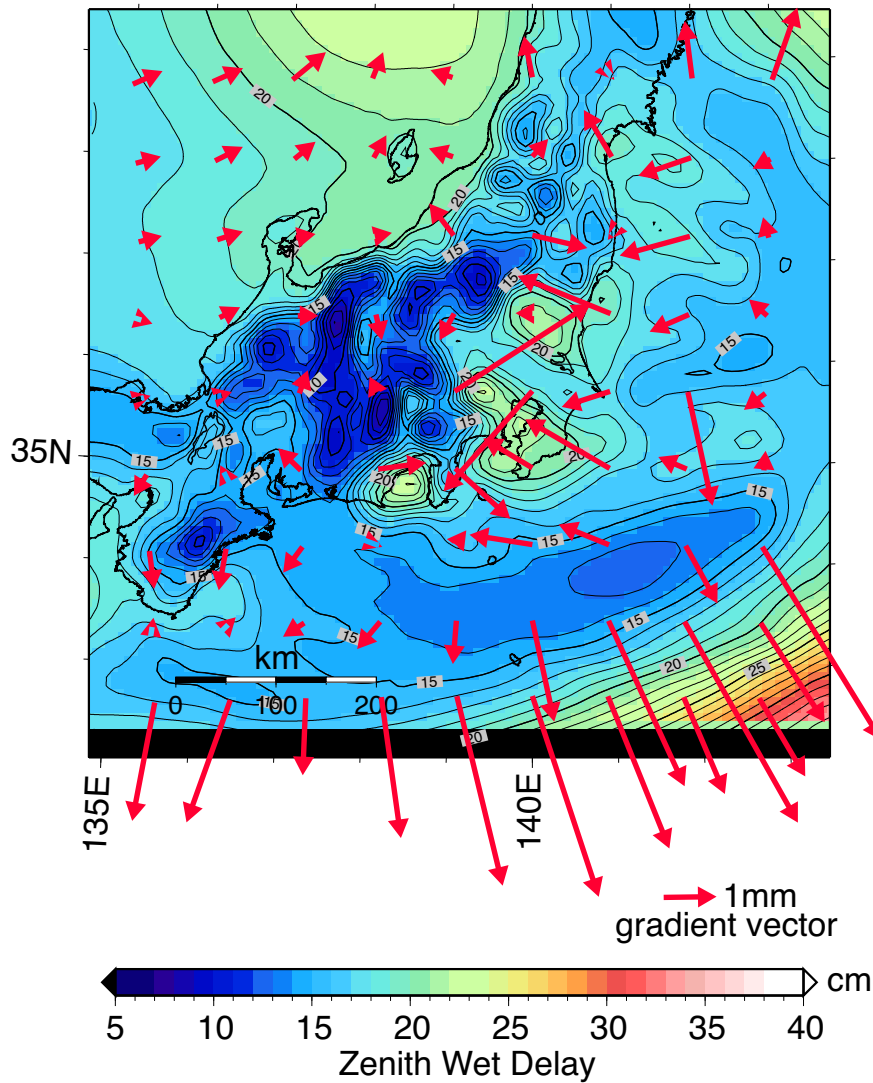


図 5 1989年6月29日0時UTCの気象庁10km数値予報データから計算した天頂方向の湿潤遅延量マップ。図では右下すみの日本列島南方海上に低気圧の中心が位置し、そこに向かって水蒸気が流れ込んでいる。図中の矢印は水蒸気量分布の空間勾配を示し、矢印の向きは水蒸気量が最大となる方向、そして矢印の大きさはその勾配の傾度を示す(詳しくは別文献[11]を参照されたい)。

表 1 気象庁が定常業務で用いている客観解析データ[13]。客観解析データは次の表2で示す数値予報モデルによる予測の初期値となる。

データ名	解析領域	水平格子数 (解像度)	鉛直層数	上端気圧	計算頻度
メソ解析	日本周辺	361 × 289 (約 10km)	地上 + 40層	10hPa	8回/日(3時間毎) (00UTC-21UTC)
領域解析	東アジア	324 × 257 (約 20km)		10hPa	2回/日 (00UTC, 12UTC)
全球解析	地球全体	640 × 320 (約 0.5625度毎)		0.4hPa	4回/日(6時間毎) (00UTC-18UTC)

であり、メソスケール現象の大部分を再現できる。

最近、気象庁が提供する数値予報モデルから算出されるデータが複数の大学、あるいは研究グループによってイン

ターネット上で提供されるようになってきた。筑波大学[16]や地球流体電脳倶楽部[17]によるプロジェクトがそれである。気象庁の数値予報データは、(財)気象業務支援センター

表 2 気象庁が定常業務で用いている数値予報モデル [13]

モデル名	予報領域	水平格子数 (解像度)	鉛直層数	予報期間	計算頻度
メソモデル	日本周辺	721 × 577 (約 5km)	50 層	15 時間	8 回/日
領域モデル	東アジア	325 × 257 (約 20km)	40 層	2 日間	2 回/日
全球モデル	地球全体	640 × 320 (約 60km)	40 層	~ 9 日間	4 回/日
台風モデル	台風周辺	271 × 271 (約 24km)	25 層	3.5 日間	4 回/日
アンサンブル 週間予報モデル	地球全体	320 × 160 (約 110km)	40 層	9 日間	1 回/日
1 か月 予報モデル	地球全体	320 × 160 (約 110km)	40 層	1 か月	1 回/週

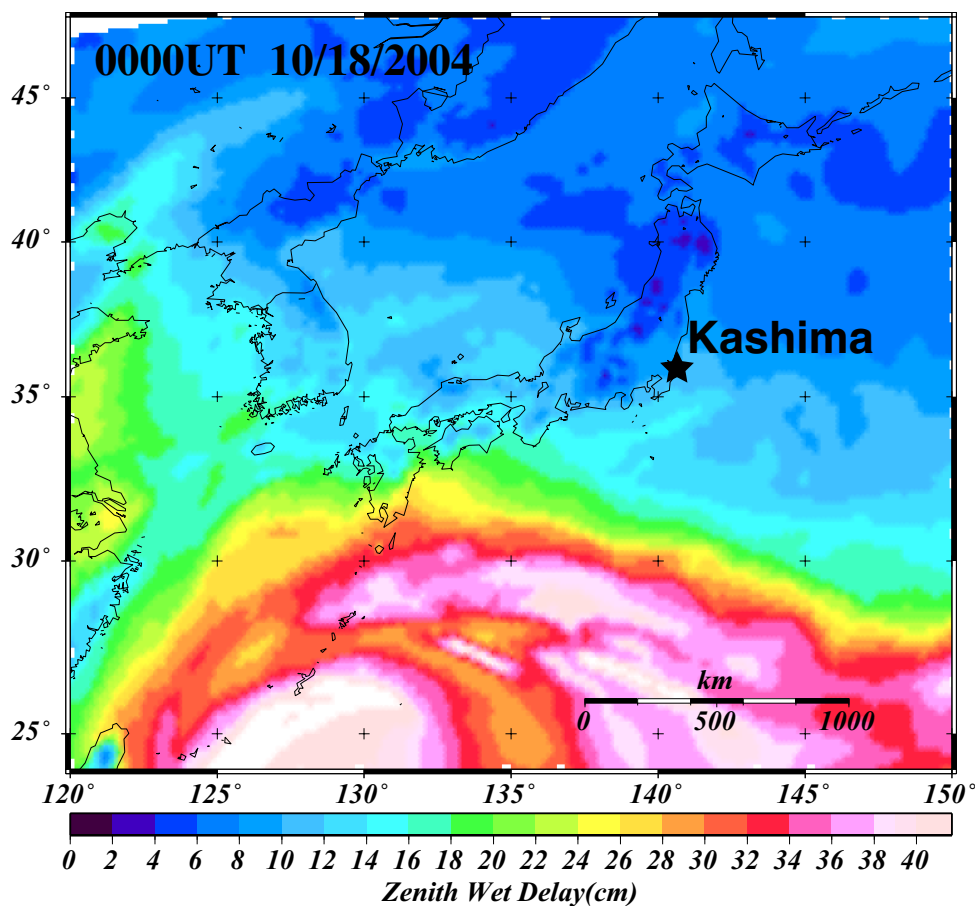


図 6 2004 年 10 月 18 日 0 時 UTC の気象庁メソ客観解析データから計算した ZWD の分布図。日本列島の南側に見えている ZWD の値が 30cm を越える広大な領域は台風 23 号の中心に吹き込む大規模な水蒸気の流れを示している。

を通じて配信コスト分の対価を支払うことにより有償でオンライン配信されている。ただし、配信後のデータ利用については現時点では特に制限がないため、先のプロジェクトなどが用意したアーカイブから毎日のデータを入手できる。例えば、地球流体電脳倶楽部のサイトには 2002 年 5 月 15 日から現在に至るまでのメソモデル、領域モデル、全球モデルの各モデルから算出された数値予報データがある。

図 6 は、一例として先に紹介したメソモデルの初期値として用いられるメソ客観解析データ [13] から求めた ZWD の空

間分布を示したマップである。ここでは、データの全格子点に与えられる気温、気圧^(注3)、相対湿度から式 (6) を用いて計算した湿潤項の鉛直プロファイルを積分することで ZWD を算出した。この客観解析データは、間隔 10km の格子点が経度方向に 361 個、緯度方向に 289 個並び、中国大陸東岸からほぼ我が国全域を含む広大な領域での大気現象を解析で

(注3): 正確には一定の気圧面 (指定気圧面) の高度 (“ジオポテンシャル高”と呼ぶ) として与えられる

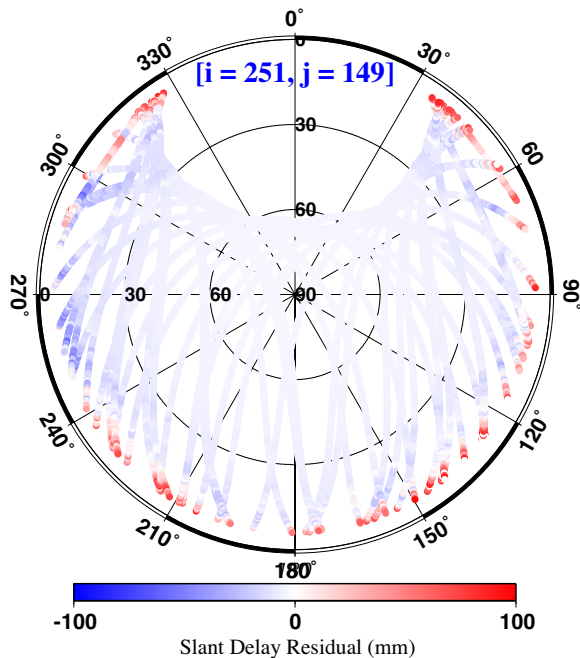


図7 2004年10月18日0時UTCの気象庁メソ客観解析データを用い、仮想的なGPS衛星配置を想定して波線追跡法により計算した視線遅延量。ただし、球対称の大気構造を仮定して計算した視線遅延量からの残差でプロットした。

きる。したがって、このデータを用いて、アジア周辺あるいは地球規模で季節変動や様々なメソスケール現象下での大気遅延の振る舞いについてより詳細に調べることができる。また、アジアモンスーン地域に適した異方性マッピング関数を算出する目的にも応用可能である。そこで、我々は、かつての試作ソフトウェアを元に、最新の数値予報データに適合した大気遅延推定ツールの開発に着手した。

3.4 視線遅延量の計算

ここでは、波線追跡法を用いて視線遅延量を計算するツールの試作版で得られた予備の結果を紹介する。図7は、ある1日の24時間に鹿島において観測できるGPS衛星の方位と仰角に基づいて計算した視線遅延量の振る舞いを表現したものである。具体的な計算は次のように行った。まず、客観解析データを用いて各方位仰角での視線遅延量 (ΔL_{pd}) を計算した。次に、格子点上の地表から大気上層までの屈折率の鉛直プロファイルが全ての方位で一定と仮定した球対称大気構造の元で同じく各方位仰角にしたがって視線遅延量 (ΔL_{sym}) を計算した。双方の差 ($\Delta L_{PD} - \Delta L_{sym}$) が大気の大気構造の影響を意味し、この値(残差)が図7に示されている。この事例では、図6と同じ時刻のメソ客観解析データを用いて計算した。図6に鹿島の位置を星印で示すが、南側に湿潤な領域、西側に比較的乾燥した領域が分布している。一方、図7の残差プロットでは南西から南東にかけて正の値が卓越し、西側では負の値が分布しており、これらの特徴は先のZWD

分布の傾向と調和的である。

今回はまだ試作ツールでの解析であり、一事例を示したのみである。今後、解析事例を増やし、かつ現在使用されているマッピング関数との比較を行うなど、評価を進める予定である。

4. まとめ

気象庁の数値予報データを用いてマイクロ波の大気伝搬遅延量を推定するツールの開発に着手した。この開発は、VLBI測地観測、GPS、GLONASS、あるいはGalileoなどのGNSSや準天頂衛星システムによる地上での測位や衛星の精密軌道決定、あるいは地上の追跡局による惑星探査機の航法支援など、大気に覆われた地球上という条件下で高精度計測を望む場合に不可避な大気遅延の影響を取り除くことが究極の目的である。気象庁では、4種類の客観解析データ、及び6種類の数値予報モデルを定常業務に用いているが、このうち空間分解能5kmのメソモデルデータをはじめ3種類の数値予報モデルデータについてはインターネット経由で自由に入手可能である。これらのデータを用いることで、時間的にも空間的にも顕著な大気変動が起きているアジアモンスーン地域という世界でも有数の湿潤地域で利用可能な遅延量除去手法の確立に繋げることが出来ると考えている。まず、本開発では、波線追跡法を用いて任意の方位・仰角からの電波の伝搬経路に沿って大気遅延を計算するプログラムの完成を目指した。今後、ソフトウェアの改良を重ね、水蒸気の空間変動を考慮した我が国独自の遅延量除去モデル(日本版異方性マッピング関数)の開発や、様々な気象条件下での大気による計測誤差評価に繋げていきたいと考えている。

謝辞 気象庁の萬納寺信崇氏(現気象庁台風センター所長)より気象庁10km格子点データの提供を頂いた。また、地球流体電脳倶楽部[17]のサイトからは数値予報モデルデータやデータ取り扱いツールを取得させて頂いた。ここに記して感謝の意としたい。

参考文献

- [1] Macmillan, D. S. and C. Ma, Evaluation of very long baseline interferometry atmospheric modeling improvements, *J. Geophys. Res.*, 99, 637-651, 1994.
- [2] Boehm, J. and H. Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.
- [3] Boehm, J., B. Werl and H. Schuh, Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629, 2006.
- [4] Ichikawa, R., M. Kasahara, N. Mannoji, and I. Naito, Estimations of atmospheric excess path delay based on three-dimensional, numerical prediction model Data, *J. Geod. Soc. Japan*, 41, 379-408, 1996.
- [5] Thayer, G. D., An improved equation for the radio re-

- fractive index of air, *Radio Sci.*, 9, 803–807, 1974.
- [6] Smith, E. K. and S. Weintraub, The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, *Proc. IEEE*, 41, 1035–1037, 1953.
 - [7] 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,
 - [8] Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97, 15787–15801, 1992.
 - [9] Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 101, 3227–3246, 1996
 - [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] 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.
 - [13] 平成 17 年度数値予報研修テキスト「第 8 世代数値解析予報システム」, 気象庁予報部編、(財) 気象業務支援センター発行, 数値予報解説資料 38, 2005 年 12 月.
 - [14] 平成 18 年度数値予報研修テキスト「数値予報モデル構成の改善」, 気象庁予報部編、(財) 気象業務支援センター発行, 数値予報解説資料 39, 2006 年 12 月.
 - [15] 気象庁 WEB サイト,
<http://www.kishou.go.jp/know/whitep/1-3-1.html> より
 - [16] GPV/JMA Archive(筑波大学),
<http://gpvjma.ccs.hpc.jp/gpvjma/index.html>
 - [17] 地球流体電脳倶楽部,
<http://davis.rish.kyoto-u.ac.jp/>