

1D15 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

○市川隆一 関戸衛 小山泰弘 (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 Numerical Weather Prediction Model

Ryuichi ICHIKAWA , Mamoru SEKIDO ,

and Yasuhiro KOYAMA (KASHIMA SPACE RESEARCH CENTER, NICT)

Key words: GNSS, VLBI, atmospheric path delay, 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^(注1)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]。

気象学の分野で天気予報に用いられる数値予報データを大気遅延の除去を目的としたモデル構築に応用する研究が最近進み、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。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常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)：地球自転速度変動や自転軸のふらつきを言う。前者は振幅が 1000 分

の 1 秒程度の年周変動が、また後者は周期 1 年、及び 1.2 年、振幅 3~10m の変動が支配的であるが、いずれも周期、振幅が 1 桁以上小さい変動も大気、海洋、固体地球の影響によって生じている。

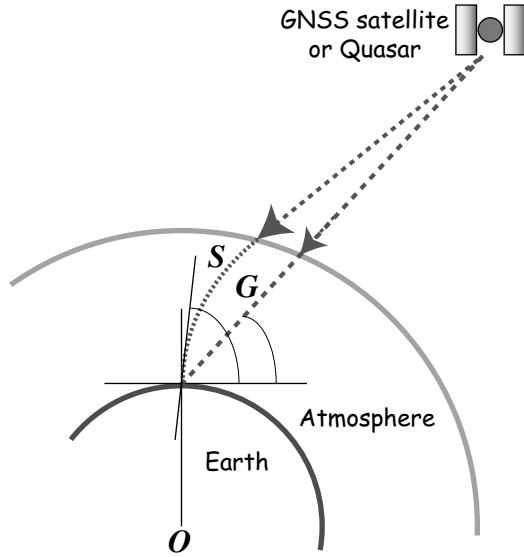


図1 大気屈折の模式図

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[2]、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天気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。本講演では、試作プログラムによる予備的計算結果について報告する予定である。

2. 大気遅延誤差とその推定モデル

2.1 大気遅延の基本原理

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、湿潤大気の屈折率は以下の式で与えられる[3]。

$$(n-1) \times 10^6 = K_1(P_d/T) + K_2(P_v/T) + K_3(P_v/T^2), \quad (2)$$

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[4][3]。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。

$$(n-1) \times 10^6 = K_1(P/T) + K'_2(P_v/T^2) \quad (3)$$

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

ここで、式(3)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)第2項の 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、

$$T_m = [\int (P_v/T) dz] / [\int (P_v/T^2) dz]. \quad (5)$$

と定義して T の代わりとする[5]。なおこの 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[6]。

一般に、式(3)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”と呼び、これを積分して得られる遅延量を“静水圧遅延量”と呼ぶ。式(3)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逆比例して小さくなることを示し“湿潤項”と呼ぶ。この水蒸気の電磁物性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”と呼ぶ。

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

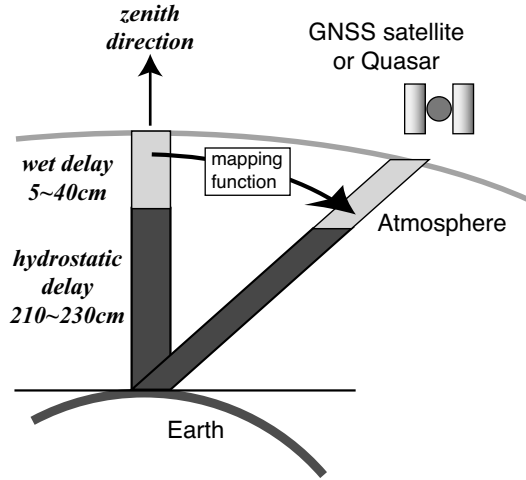


図2 マッピング関数の模式図

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。

$$\Delta L = \Delta L_h^z M_h(\theta) + \Delta L_w^z M_w(\theta), \quad (6)$$

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。これらに掛けられている $M_h(\theta)$ 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表される [7]。

$$m(\theta) = \frac{1}{\sin \theta + \frac{a}{\sin \theta (or \tan \theta) + \frac{b}{\sin \theta + \frac{c}{\sin \theta + \dots}}}} \quad (7)$$

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）が開発され、実用に供されてきた [8] [9]。異方性マッピング関数では、大気構造の水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. 数値天気予報データと遅延量推定への応用

3.1 数値天気予報データ

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、その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。これを初期値として、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した）。この計算で用いられるソフトウェアを“数値予報モデル”と呼び、計算結果が“数値天気予報データ^(注2)”である。

3.2 数値天気予報データによるマッピング関数推定

ここ数年、前述の数値予報モデルを GNSS 観測や VLBI 観測の大気遅延除去に応用し、大気の水水平変動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する手法が主に欧米の研究者を中心に進められている [11], [12], [13]。しか

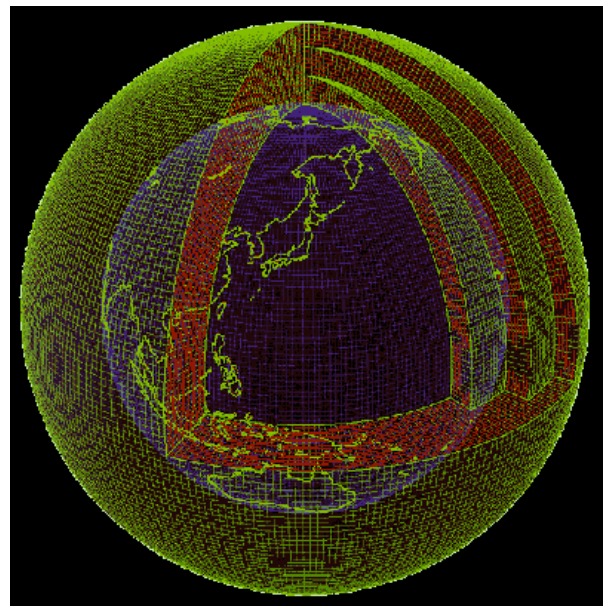


図3 気象庁数値予報モデルの計算格子の概念図 [10]

(注2)：単に数値予報データと呼ぶこともある

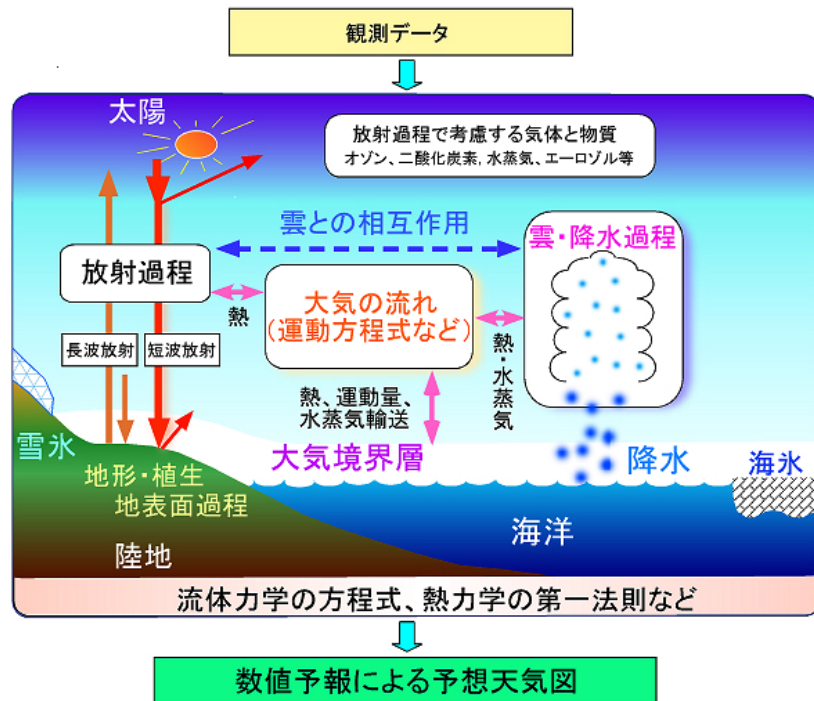


図 4 気象庁数値予報モデルで考慮されている様々な物理過程 [10]

表 1 気象庁が定常業務で用いている数値気象データ [10]

モデル名	予報 領域	水平 解像度	予報 期間	計算 頻度
メソモデル	日本周辺	5 km	15 時間	8 回/日
領域モデル	東アジア	20 km	2 日間	2 回/日
全球モデル	地球全体	60 km	～9 日間	4 回/日
台風モデル	台風周辺	24 km	3.5 日間	4 回/日
アンサンブル 週間予報モデル	地球全体	110 km	9 日間	1 回/日
1 か月 予報モデル	地球全体	110 km	1 か月	1 回/週

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モデルに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3)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 気象庁数値天気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 格子点データ) を用いて大気遅延量の計算ソフトウェアを試作した [2]。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、十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、2006 年 9 月現在で表 1 に示すように 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。中でも、メソモデルは格子間隔 5 km という極めて高分解能のモデルであり、メソスケール現象の大部分を再現できる。

さらに最近、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 [14] や地球流体電脳倶楽部 [15] 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、これらのデータのうち、一例としてメソモデル

(注3)：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。

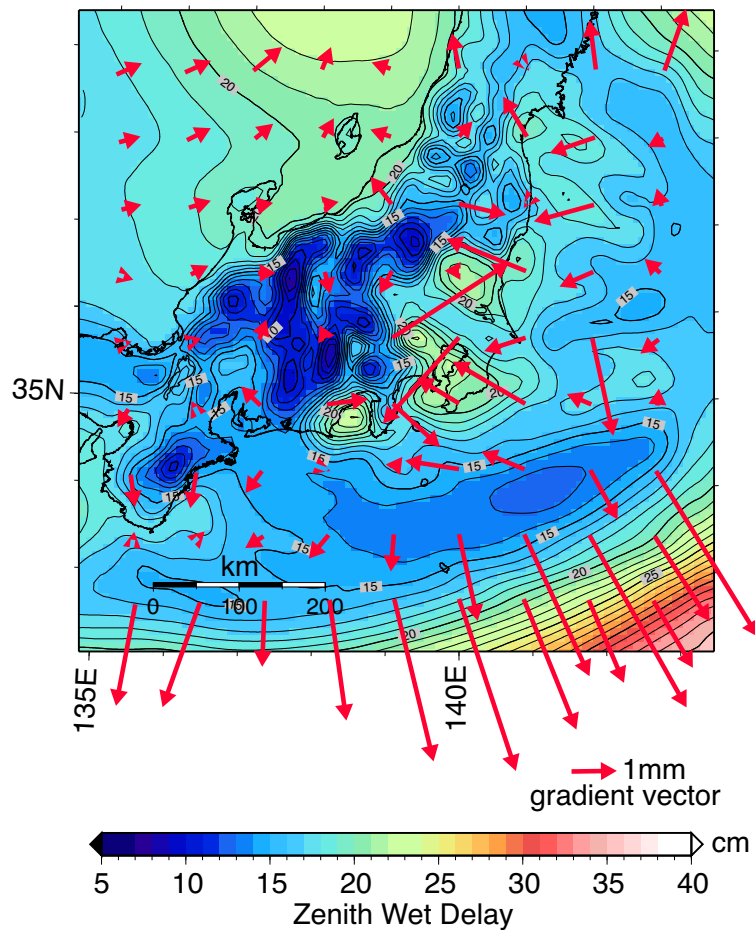


図 5 1989 年 6 月 29 日 0 時 UTC の気象庁 10km 数値予報データから計算した天頂方向の湿潤遅延量マップ。図では右下すみの日本列島南方海上に低気圧の中心が位置し、そこに向かって水蒸気が流れ込んでいる。図中の矢印は水蒸気量分布の空間勾配を示し、各々の場所において最も水蒸気の多い方向に矢印が向く。この空間勾配は、60 セットの方位・仰角の組み合わせから波線追跡法を用いて数値予報データより計算した視線方向の伝搬遅延量を元にして推定した。

データに含まれる地上気温の分布を示したマップである。メソモデルは、間隔 5km 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ために極めて有効と考えられる。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適用可能である。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。このツールでも電波の伝搬経路を波線追跡法により計算する。現時点では、コーディングには Fortran を用いているが、将来的には汎用性や可視化を考慮して MATLAB への移植を考えている。

4. ま と め

気象庁の数値天気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。これは、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欠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、6 種類の数値天気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もたらされ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。

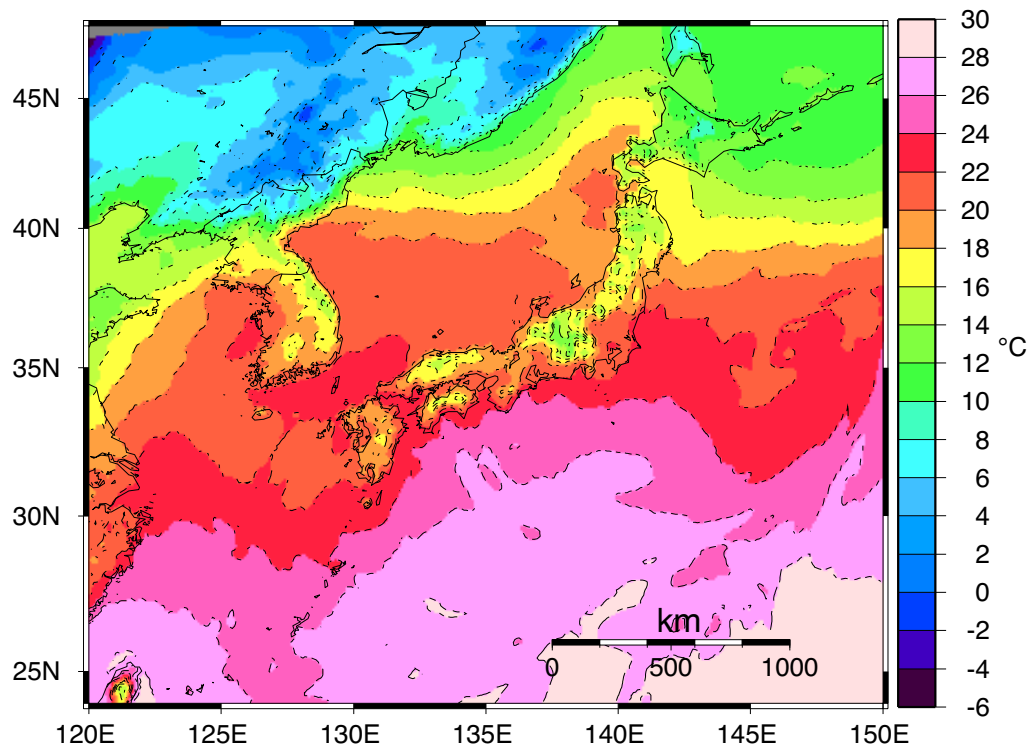


図 6 2004 年 10 月 1 日 0 時 UTC の気象庁メソモデルデータから計算した地上気温の分布図。

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す。その後、このツールを用いて、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 [15] のサイトからは数値予報モデルデータやツールを取得させて頂いた。ここに記して感謝の意をしたい。

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] 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.
- [3] Thayer, G. D., An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, **9**, 803–807, 1974.
- [4] Smith, E. K. and S. Weintraub, The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, *Proc. IEEE*, **41**, 1035–1037, 1953.
- [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] 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.
- [7] Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3227–3246, 1996.
- [8] MacMillan, D.S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1041–1044, 1995.
- [9] 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.
- [10] 気象庁 WEB サイト,
<http://www.kishou.go.jp/know/whitep/1-3-1.html> より
- [11] 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.
- [12] Boehm, J. and H. Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.
- [13] 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.
- [14] GPV/JMA Archive(筑波大学),
<http://gpvjma.ccs.hpc.jp/gpvjma/index.html>
- [15] 地球流体電脳倶楽部,
<http://davis.rish.kyoto-u.ac.jp/>