

学 位 論 文 題 名

Assesments of Wet Troposphere Delay
from Numerical Prediction Data and
Its Implications for Space Geodesy

(数値予報データによる大気電波伝搬遅延量の評価とその宇宙測地学的意義)

学位論文内容の要旨

GPS(汎地球測位システム)やVLBI(超長基線干渉計)は、人工衛星の軌道決定精度や原子時計の精度から、地球上の3次元相対位置を1cmの精度で決定できる。これらの宇宙測地技術は、数年の時間スケールでのプレート運動や数日から数年の時間スケールでの地球回転変動の検出に成功している。さらに、1年で約2mmと言われる海水面上昇モニターへの宇宙測地技術の応用が検討されている。

ところが宇宙測地技術において、地球大気の影響は不可避である。とりわけ、対流圏内の水蒸気による電波伝搬遅延量(Wet Troposphere Delay:以後、これをwet delayと呼ぶ)が宇宙測地観測の最大の誤差要因となっている。宇宙測地の究極的な観測精度を達成するためには、このwet delayを実際の大気の時空変動に基づいて推定することが不可欠である。

大気中の水蒸気量変動を捉えることは、気象学において最も基本的な関心事のひとつである。現在、天気予報の目的で最近使用される数値予報モデルから、3次元格子点データが算出されている。このデータから実際の大気の時空変動に即したwet delay推定が可能である。さらに、この値を宇宙測地の補正へ適用することにより、測位精度を飛躍的に向上させることが期待できる。私の研究では、格子点データによるwet delay推定法を確立することが最大のモチーフである。

従来は、天頂方向のwet delayを推定し、これにマッピング関数を乗じて任意仰角のwet delayを求める方法が用いられてきた。ここでマッピング関数とは、球対称大気モデルに基づいて求めた仰角依存の係数である。しかしながら、大気構造の方位異方性を考慮したwet delay推定法はいまだに存在せず、球対称大気モデルに基づく従

来の wet delay 推定法すらも、十分にその適用限界が評価されていない。

この研究では、まず格子点データを用いて大気時空変動を反映した wet delay を波線追跡法により推定する方法を確立した。これは、今回の研究で初めて確立された方法である。数値予報データは、その保持する時空分解能より大きいスケールの大気時空変動を再現できることが既に確かめられている。したがって、この推定法で求められた wet delay は、現実の大気を反映した量とみなすことができる。そこで、この値を規準として従来の wet delay 推定法の適用限界を評価した。第 1 部ではこの wet delay 推定誤差について評価した。次に第 2 部では、各推定誤差に起因する測位誤差を求め、その値に基づいて従来の wet delay 推定法を量的に評価した。

まず、気象庁 10km 格子地域モデルから出力された格子点データに基づき波線追跡法によりある方位・仰角のある観測局における wet delay を求め、これを $RT3$ とする。気象庁 10km 格子地域モデルデータ（以下 10km データと呼ぶ）はメソスケールの数値予報を目的とする。10km データに表現される水蒸気量の時空変動は、ラジオゾンデ観測による水蒸気量変動と良く一致している。したがって、 $RT3$ は実際の大気変動を反映した wet delay 推定値とみなすことができる。ここでは、1989 年 6 月 28 日 12 時 (UT) から 29 日 12 時 (UT) まで 3 時間毎に出力された 10km データを使用した。

この研究では、以下の 3 通りの wet delay 推定法を評価した。まず、(1) 標準大気モデルの地上値（気圧 1013.25hPa、気温 15 度、相対湿度 50%）に基づき、Saastamoinen [1972] の大気モデルを用いて算出した天頂方向の wet delay を求め、これを ST とした。次に、(2) $RT3$ の計算に用いた同じ点において、格子点データの地上値（気温、気圧、露点温度）から Saastamoinen [1972] の大気モデルを用いて算出した天頂方向の wet delay を求め、これを SM とした。任意の仰角での ST 、及び SM は、天頂遅延量に Chao [1972] によるマッピング関数を乗じて求めた。最後に、(3) 同じ点において、10 km データから与えられる観測局上の大気鉛直プロファイルから構築した球対称大気構造に基づき、波線追跡法により求めた wet delay を $RT1$ とした。これは、水蒸気ラジオメータ (WVR) により求められた天頂遅延量にマッピング関数を乗じて求めた wet delay と等価である。

$RT3$ と各推定値 ST 、 SM 、及び $RT1$ との残差は、それぞれの方法での推定誤差とみなせる。特に $RT3$ と $RT1$ との残差は大気の方位異方性の影響を示す。そこ

でこれらの各残差に基づいて、各推定法の評価を行った。評価は、(a) 天頂方向の S T、及び S M 推定誤差、(b) R T 3 と R T 1 との残差から求めた一点での wet delay 方位異方性、(c) 基線の両端の観測局における、wet delay の差(differential wet delay)、及び(d) differential wet delay を用い実際の GPS 観測を想定して算出した測位誤差の 4 通りの値を求めて行った。(c)、及び(d)の計算は、“つくば”を固定点とした場合について行い、双方の計算共に 10km データの全格子点を基線の相手局とした。なお、(d)の計算は single difference と double difference の 2 通りの解析手段にしたがって行った。

まず、(a)の評価では、S T の推定誤差は 15cm 以上、S M の推定誤差は 10cm に達した。(c)の計算結果によれば、これらの天頂方向の wet delay 推定誤差は、S T で 100 cm、S M で 30cm にも及ぶ differential wet delay の推定誤差をもたらす。次に、(b)の比較では、方位による R T 1 推定誤差が仰角 10 度で 8~10cm、仰角 15 度では 2~4cm に達することがわかった。(c)での計算結果によれば、大気の方角異方性に起因する R T 1 の differential wet delay 推定誤差は 1~9cm に及ぶ。

実際の GPS 観測を想定した(d)の計算では、S T 推定誤差による測位誤差が最大 80cm、また S M 推定誤差による測位誤差が最大 40cm にも達する。これに対し、R T 1 推定誤差による測位誤差は劇的に小さくなる。しかしながら、最大で 10cm に達する測位誤差が依然として残る。これは、太平洋上にある寒冷前線の前面と後面での水蒸気量分布の差に起因する wet delay 推定誤差が生じ、その結果もたらされた測位誤差と考えられる。

以上の結果から、球対称大気モデルに基づく従来の wet delay 推定法を用いる限り、1cm を越える精度での宇宙測地観測は不可能と結論できる。一方で、格子点データによる wet delay 推定法は、どこの観測点においても水蒸気量分布の方角異方性に起因する水蒸気屈折率の水平傾度を考慮した推定が可能である。この研究により、今後の宇宙測地の展開には気象学と測地学との連携が不可欠であることが明確に示された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	岡田	廣
副査	助教授	笠原	稔
副査	助教授	西田	泰典
副査	助教授	上田	博
副査	助教授	内藤	勲夫

(国立天文台地球回転研究系)

学位論文題名

Assesments of Wet Troposphere Delay from Numerical Prediction Data and Its Implications for Space Geodesy

(数値予報データによる大気電波伝搬遅延量の評価とその宇宙測地学的意義)

本論文は、GPS・VLBIといった人工衛星やキューサーから発せられる電波を用いる宇宙測地の、最大の誤差要因である大気電波伝搬遅延量(EPD: Excess Path Delay)の時空変動を数値予報データを用いて初めて明らかにし、宇宙測地に対するその影響を詳細に評価したものである。

宇宙測地は、原理的には1cm以下の精度が達成可能であるといわれ、高精度の3次元相対測位を可能にした新しい手法として地球物理学の多くの分野に計り知れない影響を与えている。しかしながら、宇宙測地においては不可避免的に地球大気を通過する電波を用いるため、EPDに起因する誤差の克服が精度向上の鍵を握っている。EPDは誘導双極子の効果を持つ大気分子によるhydrostatic delayと永久双極子の効果を持つ水蒸気分子によるwet delayとに分けることができる。

所で現実の大気が3次元的に変動することは自明であるが、これまでの測地学では大気を球対称構造を持つものとして扱ってきた。そのため、現実の大気変動のもとで宇宙測地に対するEPDの影響を評価することが絶対不可欠であるにもかかわらず、そのような研究は極めて不十分なものであった。申請者は、天気予報を目的とする数値予報モデルの基礎となる3次元格子点気象データに着目し、このデータにより計算さ

れるEPDの時空変動を調べた。ここでは、気象庁数値予報課から特別に提供された10 km格子・地域モデルが用いられ、このモデルから算出されるデータに基づき波線追跡法によりEPDが計算されている。この計算は、従来は議論が不十分であった大気構造の異方性に起因するEPD空間変動を、数値予報モデルの計算領域内のいかなる場所においても量的に求めることを可能にした。この計算結果により、wet delayの異方性がhydrostatic delayのそれをはるかに上回ることがまず示されている。このことは従来の研究からも予想されてはいたが、本論文により完全に検証がなされたとみなせる。

さらに、申請者は3次元格子点データに反映される大気構造のもとでwet delayのみに起因する測位誤差をGDP観測を想定して計算し、従来の球対称大気モデルに基づくwet delay補正法を適用した場合の測位誤差と比較している。この比較は、従来のwet delay補正法の問題点を明らかにし、これらの適用限界を示す目的でなされた。

まず、なんらwet delayの補正を行わない場合の測位誤差は最大1mにも達することが示された。この顕著な値は、例えば寒冷前線の前面のように多湿の空気塊が存在する方向と基線方位が一致する場合に生じる。また、測位誤差が基線長に依存して増大すること、仰角30度以下の衛星を観測した場合水平方向の測位誤差が鉛直方向のそれより卓越すること、及び測位誤差ベクトルの向きが最も低仰角の衛星の方位に強く依存することが同時に示されている。

最も特筆すべき点は、寒冷前線により生じる水蒸気分布の勾配と基線方位が平行である場合、wet delayの異方性による測位誤差が最大10cmにも達することである。この事実は、従来のwet delay補正を使用する限りは1cmを越える測位精度を達成することは不可能であることを意味する。これに対し、本論文で用いられた3次元格子データによるwet delay推定法を用いれば、最も効率よく、かつ効果的に補正できることは明らかである。

以上の成果は、今後宇宙測地的手法を用いて、プレートテクトニクスの検証、地球回転の精密決定、海水面変動の精密測定等を行うに際し、多大の寄与をなすものであり審査員一同は、申請者が博士の学位を受けるに十分な資格を有する者と認める次第である。