

GPS気象学による水蒸気情報とGPSの精度向上

Water Vapor Information and Improvement of Accuracy of GPS through GPS Meteorology

地理地殻活動研究センター 畑中雄樹・宮崎真一・中川弘之
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Yuki HATANAKA, Shin'ichi MIYAZAKI, Hiroyuki NAKAGAWA

要 旨

水蒸気は、宇宙測地技術の最大のノイズ源として観測値に影響を与えるが、これを逆にGPSデータから気象学的シグナルとして推定することもできる。国土地理院の1000点のGPS観測データは、全国ほぼ均一に分布し、連続的に観測していること、上空の水蒸気量の総量が反映されることなど、ラジオゾンデや地上の気象観測とは独立なデータとして注目されている。

測地学と気象学の両分野の学際的共同研究によって、GPS観測網から推定される水蒸気情報による数値予報の精度向上が図られる一方、気象学的知見を生かした宇宙測地技術のさらなる精度向上、またそれを通して地球科学への貢献が期待される。

1. はじめに

1980年代後半には数ppm (10^{-6}) のオーダーであったGPSの測位精度は、1990年代に入って格段の向上を遂げ、現在では全地球で1cmレベルの地殻変動を議論できるまでになった(Blewitt, 1992)。このめざましい精度向上をもたらした要因には、IGS (International GPS Service) によるグローバルGPS観測網の整備、IGSによる精密な軌道情報と地球回転パラメータの定常的な供給、地球規模の3次元座標フレーム(ITRF; International Terrestrial Reference Frame)の精度向上などがあるが、技術面でのブレークスルーとなった要因の一つが水蒸気遅延量推定手法の確立である。こうして、地殻変動監視の道具としてのGPSの地位が確固としたものになってきた一方で、地殻変動や地球ダイナミクスの研究のためにより高い精度、時間分解能が年々要求されるようになってきている。そして、時と場所によって変幻自在に変動し、GPSにとって最大のそして最も扱いにくい誤差要因である水蒸気は、今でもなおGPSの最大の誤差要因の一つである。

2. GPSと水蒸気遅延推定

ここで、GPS観測における大気遅延の問題とその推定手法について簡単にまとめてみよう。

GPS干渉測位は、GPS衛星から発信される電波の位相を2点以上の観測点で観測し、その位相差を元に基線ベクトルを推定する。観測しているのは電波の位相であり、衛星と受信機との距離(+バイアス)に相当する。衛星

からの電波は地球を覆う大気を通過する際に遅延を生じ、見かけ上衛星-受信機間の距離が長めに観測される。これが測位誤差の原因となる。

大気遅延量は静水圧遅延量と湿潤遅延量の2つに分けられる。このうち静水圧遅延量は大気遅延量の大半を占め2m程度の大きさを持つが、変動が小さいうえ気圧に比例するため、地上気圧を測定していれば簡単に補正することができる。湿潤遅延量は水蒸気に起因する遅延量で大気遅延量全体に占める割合は小さいが、変化が激しいので扱いのやっかいな誤差要因である。実際にGPSで大気遅延を推定する場合には、これらを分離せずに両者の和を全天頂遅延量として推定することが多い。

さて、位相遅延が生じることは電離層の効果とよく似ているが、電離層は周波数によって遅延の大きさが異なるので、この性質を使って2周波観測により補正することが可能である。ところが、大気遅延は周波数に依存しないので、大気遅延を補正するには別の性質を使う必要がある。ここで、話を簡単にするために、地球の大気が層構造を成していると仮定する。このとき、衛星からの電波が通過する大気の厚みは衛星が天頂方向にある時が最小で、衛星が水平近くになるに従って増大する。この仰角に依存する変化を $m(Z)$ という関数(マッピング関数と呼ばれる)で表現すると、任意の天頂角 Z にある衛星に対する遅延量は

$$\Delta T_z \cdot m(Z) \quad (1)$$

と表現される。ここで、 ΔT_z は天頂方向の衛星に対する電波の位相遅れで、以後、天頂遅延量と呼ぶことにする。マッピング関数は種々の関数が提案されているが、ほぼ $\sec Z$ の形をしている。あとは、天頂遅延量さえわかれば補正が可能になる。

もし、水蒸気の時間変化が衛星仰角の変化に比べて十分にゆっくりであるならば、観測される位相の時間変化は観測点座標によるものと(1)式で表される天頂遅延量によるもの(と位相バイアス)の和であると解釈することができる。推定モデルの中でこの2つの区別がつけば、両者を分離推定することが可能となる。実際には水蒸気は一定ではないので、その時間変化をもうまくモデル化して推定を行う。

このような座標と天頂遅延量の同時推定手法が確立されたことによってGPSの精度は著しい向上を遂げた。GEONETのルーチン解析でもこのような推定手法をとることによって精度の安定化がはかられ、その副産物として天頂遅延量が推定されている。

3. 日本型GPS気象学

図-1はGEONETによる連続観測結果からある基線の時系列を1年分プロットしたものである。890kmもの長基線にも関わらず水平成分で数mm、鉛直成分で数cmの精度が達成されているのは、前節で述べた大気遅延推定のおかげである。しかし、この図を更によく見ると、夏季にばらつきが大きくなる傾向があることが明らかに見て取れる。水蒸気の変化の激しい夏季に特に誤差が大きくなることは、大気遅延推定を行った後でも水蒸気が依然として大きな誤差要因であることを示唆している。従って、GPSの精度を更に向上させるためには、より高度な水蒸気遅延の取り扱いが必要となる。そのためには、測地学だけではなく気象学的な知見をも取り入れることが必要となるであろう。

水蒸気は、測地にとってやっかいなノイズである一方、気象学的にはシグナルである。GPSから推定される大気遅延量には水蒸気に関する情報が含まれている。水蒸気による湿潤遅延量は可降水量という気象学的に意味のあ

る物理量と比例関係にあることが知られており、その比例計数は地上気温のデータがあれば約2%の精度で見積もることが可能である(Bavis et al., 1994)。GEONETシステムにおける基線解析の副産物として推定される大気遅延量のデータは、日本全国の水蒸気をきわめて高い時間分解能で追跡することのできる気象学的に貴重なデータである。陸域でこれほどまでに高い時間空間分解能で水蒸気を測定する手段はこれまでになかったのである。GEONETは新しい水蒸気センサーとして、今や気象学研究者の熱い注目を浴びている。測地側にとっては逆に水蒸気に起因するノイズを除去するための気象学的なモデリングが必要である。ここに、測地と気象の学際協力によって問題点を両面から追求し、それぞれ単独ではたやすく解決できない水蒸気の問題に迫ろうという日本型GPS気象学がスタートしたのである。

日本型GPS気象学構想の概念図を図-2に示す。その核となるのは、GPS連続観測網と(気象)数値モデルで構成される気象水蒸気情報システムと呼ばれるフィードバックシステムである。GPS連測観測網で推定される大気遅延量と数値モデルによる気象情報を組み合わせ、互いの精度向上を目指す。その仲立ちとして大きな役割を持っているのが水蒸気情報データベースである。水蒸気情報データベースは、測地と気象の仲立ちをするだけでなく、そのやりとりから生まれる各種の水蒸気に関する情報を学術ユーザーに提供還元することによって、水蒸気に関連するより広い応用分野の発展に寄与するであろう。

4. 測位精度向上に向けて

図3はGEONETの観測点における1996年7月20日における水平測位誤差のベクトル(前後16日間の平均値からの偏差)を推定された大気遅延量の分布とともに示したものである。天頂遅延量の分布は様ではなく地域によって差がある。この分布と水平誤差の関係をを見ると、天頂遅延量が水平方向に大きく変化しているところで測位誤差が大きくなっている傾向があるように見える。

水蒸気遅延が水平方向に様ではなく不均質に分布し、たとえばある方向から来た電波が反対方向から来た電波よりも遅れて観測されると、水平方向の誤差につながる事が予想される。このような不均質を表す方法はいろいろ考えられるが、水蒸気の分布が水平方向に一次勾配を持っているというモデルが、水平多層モデルの自然な拡張として導かれる。(Davis et al., 1993; MacMillan et al., 1995)。つまり、これまでは水平方向に様であるという仮定下で天頂方向の遅延量を未知数として解いていたのに対し、新しいモデルでは天頂遅延量がどちらの方向にどれだけ変化しているかというパラメータ(大気遅延勾配)を新たに導入して一緒に推定するのである。

大気遅延勾配の推定を行った場合の水平測位誤差を図-4に示す。図-3と比べて、多くの地域(特に中部

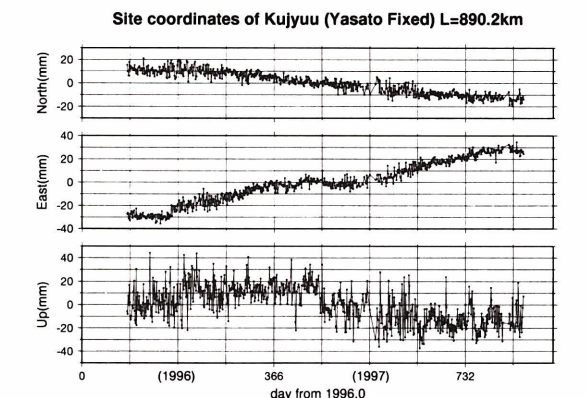


図-1 八郷観測局固定で見た久住観測局の座標時系列。上から南北、東西、上下成分。

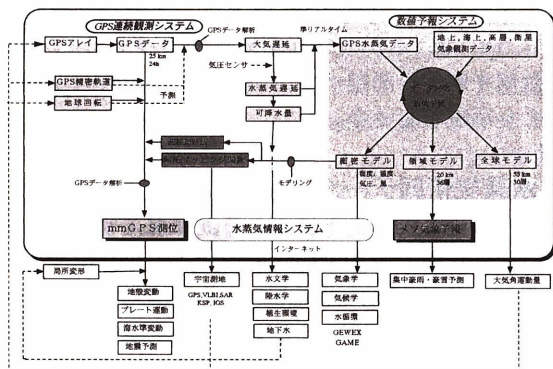


図-2 日本型GPS気象学の構想図

Zenith delay (deviation)
Coordinate (deviation) - no correction
 (1996/7/20)

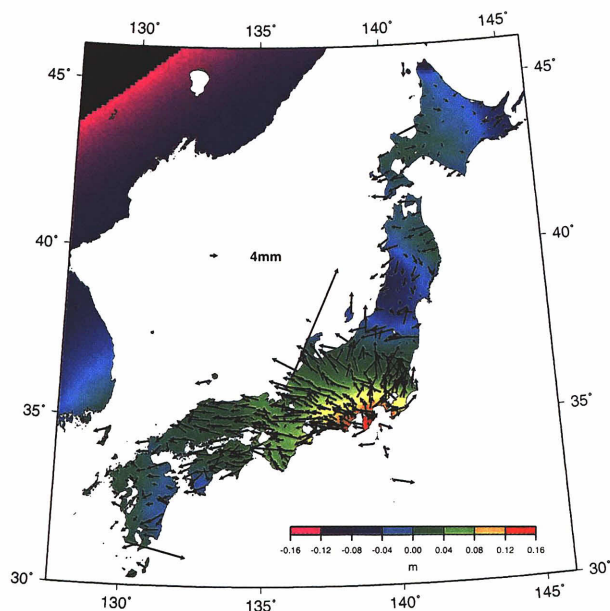


図-3 1996年7月20日における観測点座標の誤差
 (約2週間の平均値からの偏差, 矢印), 及び
 天頂遅延量の偏差(色)。

Zenith delay (deviation)
Coordinate (deviation) - correction
 (1996/7/20)

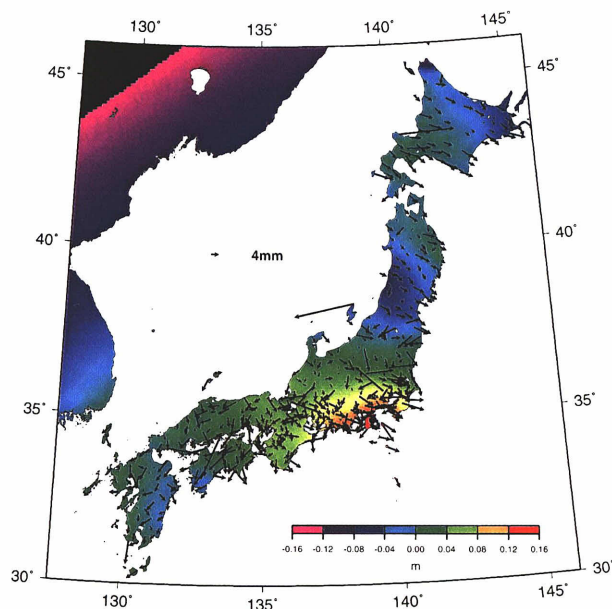


図-4 図-3と同様。ただし、大気遅延勾配を推定
 した場合。

日本)で測位誤差が小さくなっており、大気遅延勾配の推定が全体として効果があることがわかる。しかしながら、地域によっては逆に誤差が大きくなったところもあり、常に有効であるとは限らないこともわかる。今後、大気遅延勾配推定の有効性とその限界をより詳細に調査する必要がある。

ところで、2節で大気遅延推定の仕組みを説明した際に、大気遅延量と座標値(基線ベクトル)がモデルの中で区別がつくものと仮定していた。しかし、その区別がどの程度つくのかが、実は大きな問題である。実際には、この2種類のパラメータの他に位相バイアスも同時に推定するが、そうすると3種類のパラメータの相関が大変強いために解の安定性が弱まり、モデル化されていない誤差要因によって解が大きく影響を受けてしまうという現象が起きることが知られている(Beutler, 1998; 畑中, 1999)。特にアンテナやピラーによる至近距離からのマルチパスの影響が、大気遅延推定によって大きく拡大され、解に系統誤差をもたらすことは知られている(Elósegui et al., 1995)。この問題はGEONETでも知られており、座標の高さ成分に10cmを越える大きな系統誤差をもたらしていることが指摘されている。しかし、基線ベクトルの時系列の再現性だけを見てもこういった問題には気が付かない。

図5(上)は、つくばの国土地理院構内にある5つの

観測点で推定された大気遅延量の時系列をプロットしたものである。観測点はすべて300m以内の近距離に位置するので、大気遅延量は本来どの観測点もほとんど同じはずであるが、これらの観測点で推定された大気遅延量の間には最大で6cm程度のバイアスがある。これは、アンテナ位相特性とピラーによるマルチパスが正確に考慮されていないためであることがわかっている。これらを補正すると図-5(下)のようになり、観測点間のバイアスがかなり小さくなる。それと共に、座標解も主に鉛直方向に数cmオーダーの変化が生じる。これらの結果は、GPSの解析に何か問題がある時には座標値(基線ベクトル)と大気遅延の両方に大きく影響することを示している。このことを逆手に使えば、大気遅延量が正確に推定されているかどうかをチェックすることによって、観測や解析に問題がないかどうかの診断が可能であることを示唆している。

5. 水蒸気情報データベース

これまで見てきたように、水蒸気は現在でも測位精度向上の大きな鍵である。これまでに、GPS気象学の 일환として大気遅延勾配の推定やその他の誤差要因の検討を行ってきたが、今後更に分野を越えた学際協力による基礎研究が必要とされる。学際協力を有効に進めるためには、その共通基盤となるデータベースが不可欠である。

Total Zenith Delay at 5 Sites in Tsukuba

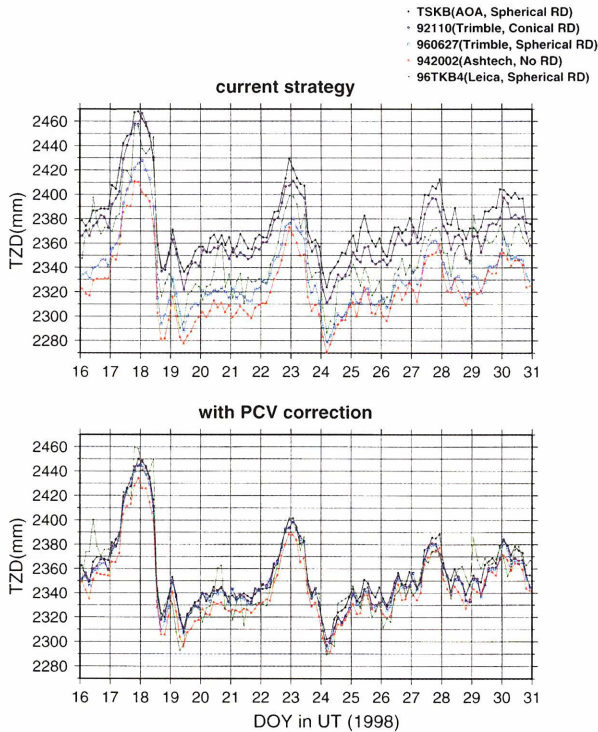
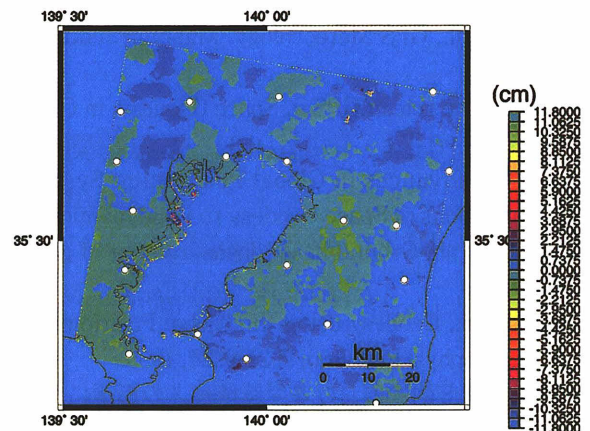


図-5 つくばの国土地理院構内にある5つの観測点で推定された大気遅延量の時系列。現在のルーチン解析によるもの(上)、及びマルチパス等による位相特性を補正して解析した結果(下)。

これを水蒸気情報データベースと呼ぶことにする。現在、GEONETで推定された天頂遅延量等のデータを、水蒸気情報データベースとして整備し共同研究者を対象に提供している。このデータベースは測地分野と気象分野のインターフェイスとしての役割を果たすだけでなく、これを核として、測地学、気象学、水文学等の水蒸気に関係のあるあらゆる分野への応用の道が開ける。このデータベースを用いて、様々な分野で応用研究が行われつつある。その一例として、GPSによって推定された大気遅延の分布と干渉SARのノイズの評価を行う研究について紹介する。図6(上)は、関東地域で約一月半の間において撮られた2枚のSARデータの干渉画像である。SARの周波数帯域はGPSのものに近いので、GPSと同様の水蒸気遅延の影響を受けたデータが記録される。そのため、もしこの間に地殻変動がなければ、干渉画像の中に水蒸気を「見る」ことができるはずである。図6(下)はSARと同じ2時点のGPSによる大気遅延の差を取ったものである。両者を比較するとパターンがよく似ていることが見てとれる。このようにして、GPSとSARという全く独立な観測から共通の水蒸気パターンを抽出することができた。このような比較によって誤差要因をクロスチェックすることによって、それぞれの測地技術の信頼性を相互に評価することができる。

SAR Interferogram 971219_980201



Tropospheric Delay from GPS (GIPSY/OASYS) (2-d trend removed) 980201-971219 1:25-1:30 UT

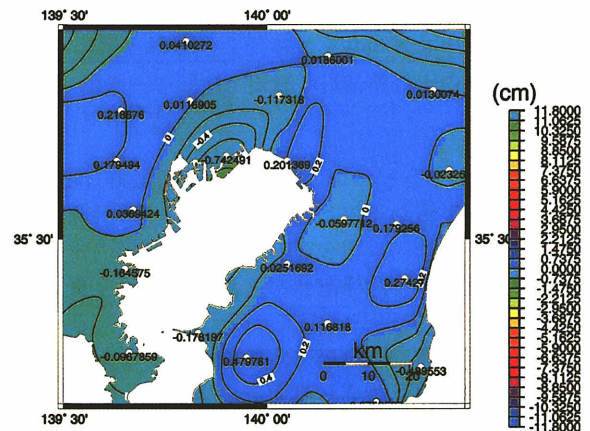


図-6 干渉SARにあらわれた位相差(上)とGPSより求めた遅延量の空間パターン(下)
時期: 1997/12/19 - 1998/2/1

今後、各分野の研究が進むにつれて、水蒸気情報データベースに対する要求も変化してゆくであろう。ニーズの変化に柔軟に対応してデータベースの内容を充実してゆくことが望まれる。

6. おわりに

測位精度の向上を中心テーマとして、日本型GPS気象学およびその初期成果を概観した。GPSによる水蒸気情報をデータベース化することにより幅広い応用が開けること。GPSの誤差には大気の不均一性が影響しており、測位精度向上のためにはこれまでよりもさらに現実的なモデルが必要であることが明らかとなってきた。水蒸気の問題を解決することができれば、GPSの精度向上という現実的な目的を満たすと同時に、さらにGPSによってmmレベルの地球ダイナミクスを議論し、新しい地球像の探求へと道を開く可能性をも秘めている。そのためにも、着実な研究を今後も続けてゆくことが必要である。

参考文献

- Bavis, M. et al., GPS Meteorology: Mapping zenith wet delay onto precipitable water., J. Appl. Meteor., 33, 379-386, 1994.
- Beutler, G. The role of GPS in Space Geodesy, in GPS for Geodesy 2nd edition, eds. P.J.G. Tennissen and A. Kleusberg, 1998.
- Blewitt, G. Advances in Global Positioning System Technology for Geodynamics Investigations: 1978-1992., in "Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology" Geodynamics Series Vol. 25, 195-213, 1992.
- Davis J. L. et al., Ground-based measurement of gradients in the "wet" radio refractivity of air., Radio Sci., 28, 1003-1018, 1993.
- Elósegui et al., Geodesy using the Global Positioning System: The effect of signal scattering on estimates of site position, J. Geophys. Res., 100, 9921-9934, 1995.
- 畑中雄樹, GPS観測におけるマルチパスの影響について, 月刊地球, 号外No.25, 200-204, 1999.
- MacMillan D. S. et al. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. Geophys. Res. Lett., 22, 1041-1044, 1995
- 宮崎真一, 岩淵哲也, 内藤勲夫, 大気遅延勾配の推定と水平測位精度の向上, 月刊地球, 号外No.25, 84-90, 1999.