

II-12 GPSデータを用いた積雲スケールの水蒸気擾乱の抽出に関する研究

京都大学大学院 学生員 亀岡 知志
 京都大学防災研究所 正員 大石 哲
 京都大学防災研究所 正員 中北 英一
 京都大学防災研究所 正員 池淵 周一

1 はじめに

近年、GPS(Global Positioning System:地球測位システム)を利用した宇宙測地技術が発達し、測地網が充実してきている。GPSを用いた測地誤差の主要因は水蒸気であるが、それを誤差として見るのではなく水蒸気情報としてみれば、解明困難なメソスケールの大気現象にとっての貴重な情報となりうる。そこで、本研究では、滋賀県信楽町のMUレーダーサイト周辺で行われたGPSの高密度集中観測を対象とし、精度の高いGPSの解析データである残差データを用いて水蒸気擾乱抽出手法に適用するための計算、考察を行う。そして、水蒸気擾乱抽出手法が実際のGPSデータを用いても適用可能かどうかの検討を行った。

2 大気モデル上での水蒸気擾乱抽出手法 3つの衛星からの2つの受信機への伝搬経路A, B, Cを図1に示す。図に示すように、大気下層では伝搬経路は近接しているの、天頂角の違いによって生じる大気遅延量の違いは、主として上空の水蒸気の影響による。そこで、上空 z [m]に強い水蒸気の擾乱がある場合に、大気遅延量の変動がすべてその高度に集中していると見なす。上空の大気遅延量のコントラストは、アンテナ i に対する伝搬経路Bの大気遅延量 ΔL_i^B と伝搬経路Aの大気遅延量 ΔL_i^A を用いて以下のように表す。

$$\frac{dAD_i^{AB}}{dx} = \frac{\Delta L_i^B \cos \theta_i^B - \Delta L_i^A \cos \theta_i^A}{z \times (\tan \theta_i^B - \tan \theta_i^A)} \quad (1)$$

ここで dAD_i^{AB}/dx は伝搬経路A, Bから求められるアンテナ i における大気遅延量の水平偏差、 θ_i^A , θ_i^B はアンテナ i に対する伝搬経路A, Bの天頂角である。

また、式(2)は、ある基準における $\Delta L_i^A \cos \theta_i^A$ からの大気遅延量の差であり、擾乱そのものを表す。

$$z \times AD_i^{AB} = \sum_{i=left_edge}^{right_edge} \frac{dAD_k^{AB}}{dx} \Delta x \quad (2)$$

上空の水蒸気擾乱の高度と水平距離を推定するために、式(1)と式(2)を受信機の位置に沿ってプロットした図において極小値をもつ点がずれ、擾乱を観測している点間に距離があることを利用する。この距離は図1を用いて説明できる。すなわち、上空の同じものを観測するためには観測

するGPSの位置が天頂角によって変化するのである。擾乱の高度 z に大気遅延量の変動がすべて集中し擾乱は z における2つの伝搬経路の高度の中心に位置するとして、以下の式がなりたつ。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(z - h_i)(\tan \theta_i^C - \tan \theta_i^A) \\ & - \frac{1}{2}(z - h_j)(\tan \theta_j^B - \tan \theta_j^A) \\ & = X_j - X_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 X_j , X_i はそれぞれ AD_i^{AB} , AD_i^{AC} が極小値をもつ水平距離であり、 h_j , h_i はそこでの地形の標高である。

式(3)を z に対して解くことにより、主として降水粒子の影響によって水蒸気が減少している高度を推定することができる。上空で水蒸気擾乱の水平距離 X は、この高度 z と式(4)を用いて以下の式で推定することができる。

$$X = \frac{1}{2}(z - h_j)(\tan \theta_j^B - \tan \theta_j^A) + X_j \quad (4)$$

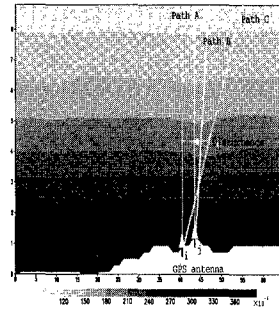


図1: 大気屈折率と3つの衛星から2つの受信機の伝搬経路イメージ

3 GPS 残差データを用いた水蒸気擾乱の抽出

3.1 GPS 残差データの概要 本研究で用いられるデータは、滋賀県甲賀郡信楽町のMUレーダー観測所およびその周辺で1995年11月13日から17日に行われた、GPS集中観測のデータを測地解析した結果の残差データである。ここで残差データとは、GPS受信機と衛星間の電波による

表 1: GPS 残差データを用いた擾乱の位置推定の結果

計算事例	ψ_A	ψ_B	ψ_i	θ_{AB}	θ_{AC}	擾乱の 高度(m)	水平距離 (m)	欠けた データの有無	備考
CASE 1 14:05	43.72	48.77	84.05	72	35	1105	1240	有	降雨強度1mm/h前後 強い下降流はない
CASE 2 19:10	48.7	62.10	36.36	66	43	989	3710	無	降雨強度2mm/h前後 強い下降流はない
CASE 3 14:20	88.12	55.30	43.10	45	61	690	3600	無	降雨強度2mm/h前後 強い下降流はない
CASE 4 14:25	19.75	59.74	40.42	65	47	1130	3800	無	高度2.5~3kmに強い下降流がある 降雨強度2mm/h前後
CASE 5 16:05	41.63	48.14	63.43	56	73	2070	4120	有	高度2.5~3kmに強い下降流がある 降雨強度1mm/h前後
CASE 6 16:10	87.22	41.36	62.82	55	51	不定	不定	無	高度5kmまでに強い下降流がある 降雨強度1mm/h前後
CASE 7 16:40	57.74	46.94	46.48	58	70	不定	不定	無	高度5kmまでに強い下降流がある 最大の降雨強度1.4mm/hを示す
CASE 8 16:45	57.15	48.94	44.01	67	65	5050	4270	無	強い下降流はない
CASE 9 18:40	43.36	49.10	77.48	74	41	不定	不定	無	最大の降雨強度1.4mm/hを示す 降雨強度4mm/h前後
CASE 10 18:45	44.84	74.91	46.90	47	71	530	3820	無	高度3~4kmに強い下降流がある 降雨強度4mm/h前後

見かけ上の距離から、その幾何学的距離と、標準大気による大気遅延を引いた残りの距離のことである。なお、このデータは解析ソフト (GIPSY) で解析されたデータである。

3.2 GPS 残差データの選別 上記の GPS データを用いるにあたっての問題点としてマルチパスの影響が挙げられる。マルチパスの影響とは、衛星からの発信波が山岳や構造物などの障害物にあたって反射され、地上の受信機が本来受信するはずのない衛星からの発信波を捕らえてしまい、実際とは異なる観測結果となってしまうことを言う。本研究では、マルチパスの影響と考えられるデータは最初から除去することによって、計算に使われるデータの精度を上げることにした。その結果、約 600 エポックのデータ中約 200 エポックのデータを用いた。

3.2 三次元的な水蒸気擾乱抽出手法の定式化 二次元的に考えたモデルでの水蒸気擾乱抽出手法を三次元的に考えるにあたって、新しく定式化した式が式 (5) である。

$$z \frac{dAD_i^{AB}}{dx} = \frac{\Delta L_i^B \cos(90^\circ - \psi_i^B) - \Delta L_i^A \cos(90^\circ - \psi_i^A)}{\sqrt{\left(\frac{1}{\sin \psi_i^A}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sin \psi_i^B}\right)^2} - \frac{2 \cos \theta_{AB}}{\sin \psi_i^A \sin \psi_i^B}} \quad (5)$$

ここで ΔL_i^A : 受信機 i に到達するパス A の残差、 ΔL_i^B : 受信機 i に到達するパス B の残差、 ψ_i^A : 受信機 i に到達するパス A の仰角、 ψ_i^B : 受信機 i に到達するパス B の仰角、 θ_{AB} : 受信機 i に到達するパス A とパス B との方位角の差である。

4 適用の結果とその考察

GPS 残差データを式 (5) に適用した計算結果を 10 個の事例に場合分けして表 1 に示す。上記の 10 個の事例の結果を総合して以下のような結論を得た。

- 上記の 10 個の CASE の結果を総合して考えてみると、単に擾乱の位置を確認するだけであれば二次元的に展開された式でも十分であった。一方で、三次元的に展開された式 (5) によって残差データの適用を行った方が、二次元的に展開された式 (1) を適用するよりも擾乱のコントラストをとらえるという点では適切であることが確認できた。これは、実際の GPS 観測によるデータを適用する場合は、パスの方位角も考慮した上で、三次元である擾乱の位置推定を行うべきだからである。

らである。よって、三次元的に展開した式による GPS 残差データの適用の有効性が示されたと言える。

- CASE6, CASE7, CASE9 のように必ずしも位置推定が出来るとは限らない。この場合、CASE5, CASE8, CASE10 のように時間を少しずらすことによってした位置推定が可能になることがあるので時間を細かくして位置推定を行う必要がある。それ以外の位置推定が出来ない原因としては、今回の観測での GPS 受信機間の距離はかなり密であるが、マルチパスの影響を受けていると考えられるデータを取り除いたデータ場合、適用できるデータ数が少なくなり、結果的に疎な観測網のデータしか使えないという問題が生じることが挙げられる。したがって、規則的にかつ 10km 四方ぐらいの広範囲の観測網で観測を行い、データを多く集めて欠けるデータが存在しないようにすることが重要となってくる。
- ほとんどの位置推定結果が低い高度の推定結果しか得られないのは、データの都合上、方位角の差が 70 度以内のパスで擾乱を捕らえるとして計算を行っているために粗い計算結果となっているからであり、この問題を解決するためには、できるだけ小さな方位角の差のパスで計算を行わなければならない。

5 今後の研究 上記の結果と問題点を踏まえた上で、国土地理院の GPS データから GPS 解析ソフト (GAMIT) を用いて、衛星と受信機間の一方向の残差データを取得する。そして、それを水蒸気擾乱抽出手法に適用し、今回の信楽での研究と比較検討して水蒸気擾乱抽出手法が適用できる空間スケールについて考察する。結果は講演時に発表する。

本研究の GPS 解析データは、名古屋大学大学院理学研究科 平原和朗先生より提供して頂きました。深く感謝いたします。

[参考文献] 1) 大石哲: 積雲の雲物理的構造解析を基礎にした洪水制御支環境の開発に関する研究, 京都大学学位論文, 1997.