

衛星測位情報の遅延効果を利用した大気中の水蒸気観測

Observation of atmospheric water vapor using the delayed satellite's information

北海道大学工学部 ○学生員 橋本弾 (Dan Hashimoto)

北海道大学大学院工学研究院 正 員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. 背景と目的

日本各地の洪水氾濫の原因である豪雨や都市機能を停止に至らず豪雪時の多くの水蒸気供給は海からの蒸発によってもたらされる。局所的な豪雨・豪雪の予測には水蒸気の観測は有効であるため、海に囲まれた日本において海上を含む空間的・時間的に密な水蒸気観測網の整備、予報システムへの活用は期待される。

現在、水蒸気観測は、ラジオゾンデ（以下、RS）を用いた高層気象観測と衛星を用いた地上観測（以下、GPS）と AMeDAS 地点での地上観測が挙げられる。RS は、高度約 30km までの観測が可能であり、世界 1500 以上の観測点で 1 日 2 回実施されている。日本には 13 観測点が存在し、気温や湿度といった気象条件状況の観測を行っている。衛星観測とは、射出したマイクロ波の反射強度を受信して観測を行う気象衛星「ひまわり」による観測や GPS 衛星(Global Positioning System)に代表される衛星測位システム(Global Navigation Satellite System)の電波の遅延効果を利用した GNSS 観測などがある。GPS 観測の時間分解能は高く、5 秒であり¹⁾、多くの研究でその精度の高さが報告されている²⁾。また衛星観測では、使用する波長が短く水蒸気を面的にしか捉えることはできないが、GPS 観測では L1, L2 帯の波長（それぞれ 19cm, 24.4cm）を使用しており、水蒸気の鉛直積算量が観測可能である。この鉛直積算量は可降水量(Precipitable Water Vapor, 以下 PWV[mm])と呼ばれている。国土地理院が全国 1300 か所以上(図-2:札幌市近郊には 4 地点)に配備している GPS 観測、GEONET(GNSS Earth Observation Network System)で観測される PWV は、2009 年から気象庁の数値気象予報モデルに組み込まれている。また GPS 観測は不足する海上観測への利用が期待されており、船舶を利用した観測でその精度の高さも確認された³⁾。

衛星からの電波を地上の受信機が捉え、二つの周波数の電磁波が地上に到達するまでの時間差から水蒸気量を観測する。GPS 衛星は高度約 2 万 km 上空を周回しており、受信機側で 4 つ以上の GPS 衛星からの搬送波を観測することで観測点の位置を決定している。

GPS 観測において観測した搬送波は以下の 6 つの影響を受けている。i)衛星の位置と理論上の軌道の不一致、ii)基準となる地上の電子時計と衛星の時刻の相対的な差、iii)電離層における電磁波の屈折、iv)対流圏内に存在する水蒸気による電磁波の屈折、v)電磁波同士の干渉、vi)地上の原子時計と受信機の時刻の相対的な差。それぞれの項目に関しては第 2 章に詳述する。

RS から推定する PWV は GPS 観測から推定される PWV の比較として利用されている⁴⁾。本研究では大気

場の状況も含めて RS 観測による GPS 観測の検証を行った。また、上空の雲の有無により PWV の値は異なると予想し、筋状雲が流入するイベントを対象に札幌近郊 4 地点および図-2 の星印で示した観測点の GPS 観測どうしの PWV の比較を行った。

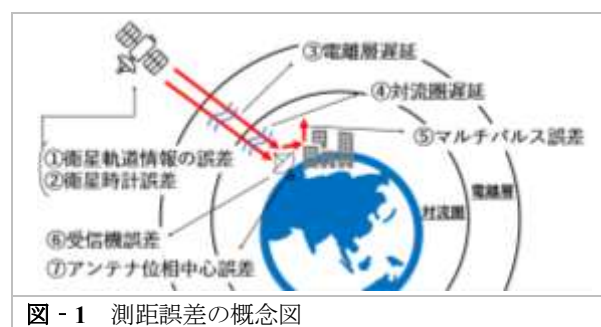


図-1 測距誤差の概念図

2. PWV の導出

2.1 遅延量の諸量

本章では第 1 章で述べた PWV（可降水量）の推定手法について述べる。観測値は衛星から射出された電磁波が受信機に到達するまでの伝搬波の経路長[m]である。経路長から実際の衛星とアンテナの距離を差し引いた値を遅延量と呼ぶ。観測した遅延量は図-1①、②、⑥、⑦による誤差を含む。遅延量の成因は図-1③、④によるものであり、後述する手法よりそれぞれの影響を分類することで PWV を推定する。

始めに図-1①の説明をする。ニュートンの万有引力の法則により地球と衛星は互いに引力が作用し合っているため二体問題として扱うことができ、衛星の軌道はケプラーの 3 つの法則から楕円軌道を描く。しかし、実際には月や太陽の引力や太陽輻射などの摂動の影響により、理論上の軌道との差異が生じる(図-1 ①)ため、これを補正する計算を行う必要がある。衛星内には原子時計が搭載されており正確に時間が管理されているが、地上の原子時計に対して 1 日 10^{-9} sec の遅れが生じる(図-1 ②)。時刻の同期には一般相対性理論と特殊相対性理論による補正が必要となり、衛星の電波に含まれる情報を元に修正する。衛星から発信された電波は高度 50km から 1000km にある電離層を通過する。電離層では太陽の紫外線や X 線により大気分子がイオン化しており、自由電子とイオンが混在している。衛星からの電波は自由電子により屈折し遅延が発生する(図-1 ③)。電離層での伝播速度に電磁波の周波数依存性があることから二つの観測値の相対的な差から電離層遅延を取り除くことができる。地上から高度 50 km までの対流圏では、大気分子の誘導双極子が電磁波により励起されて起こる遅延効果と

水蒸気分子の永久双極子が電磁波により励起されて起こる遅延効果がある(図-1 ④)。同過程については3.2節で詳述する。その他に反射波の干渉による影響(図-1 ⑤)が存在する。この影響を取り除くため周辺に電磁波を反射する物体(例えばビルなど)がない場所を選定してアンテナを設置する。受信機に搭載されている水晶時計と基準となる原子時計の時差を算出する(図-1 ⑥)。受信機時計の遅れは未知量として推定するまたは衛星間で差分をとることで取り除いている。受信する各電波のアンテナの位相中心位置が入射角により異なり、これを補正する必要がある(図-1 ⑦)。

2.2 GPS-PWV (GPS観測による可降水量)

対流圏において任意の場所での屈折率を n とすると、大気中の伝播距離 L は伝播経路 S を用いて以下のように表せる。

$$L = \int_S n dS \quad (1)$$

衛星と受信機の幾何学的な直線距離を G とすると大気遅延量は、

$$\Delta L = \int_S (n - 1) dS + [S - G] \quad (2)$$

となる。右辺第1項は伝播速度が真空中に比べて減速する効果を表しており、第2項は伝播する経路が湾曲する効果を表している。仰角が10度以下の低仰角でなければ経路が湾曲する効果が全体に占める割合は小さく、減速による効果が大半を占める。

大気の屈折率は、気温、乾燥空気分圧、水蒸気分圧の関数で以下のように表すことができる⁵⁾。

$$10^6[n - 1] = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} \quad (3)$$

T は温度、 P_d と P_v はそれぞれ乾燥空気分圧と水蒸気分圧である。 Z_d^{-1} と Z_v^{-1} は乾燥空気と水蒸気の圧縮率であり、理想気体からの違いを表している。また k_1, k_2, k_3 は実験から得られた係数であり、Bevis et al. (1992)ではその比較を行っている。これにならぬ係数を $k_1 = (77.60 \pm 0.05)[\text{KhPa}^{-1}]$, $k_2 = (70.4 \pm 2.2)[\text{KhPa}^{-1}]$, $k_3 = (3.739 \pm 0.012) \times 10^5[\text{KhPa}^{-1}]$ とする。右辺第1項と第2項は気体分子の誘導双極子に起因する効果であり、第3項は水蒸気分子内の永久双極子による効果である。全体に占める水蒸気の質量は小さいものの、永久双極子による効果が大きいので水蒸気は大気遅延に大きく影響している。

式(2)、(3)と気体の状態方程式から天頂方向における大気遅延量は、

$$\Delta L_{\text{Zenith}} = 10^{-6} \left[k_1 \int_{\text{Zenith}} \frac{R\rho}{m_d} dz + k_2 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} dz + k_3 \int_{\text{Zenith}} \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} dz \right] \quad (4)$$

$$k'_2 \equiv \left(k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_d} \right) \quad (5)$$

となり、 $R[\text{J/kmol K}]$ は普遍気体定数、 ρ は大気の密度、 $m_v, m_d[\text{kg/kmol}]$ はそれぞれ水蒸気と乾燥空気の分子量である。ここで(6)で示される大気の静水圧平衡を仮定

し、右辺第1項をZHDとにおいて高さを z 、気圧を P とすると、

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (6)$$

$$\text{ZHD} = 10^{-6} k_1 \frac{R}{g m_d} P_0 \quad (7)$$

となる。 $P_0[\text{hPa}]$ は地上気圧で、 $g_m[\text{m/s}^2]$ は

$$g_m = \frac{\int \rho g dz}{\int \rho dz} \quad (8)$$

と表される大気柱の重力加速度の平均値である。(8)を展開した一次の項は大気柱の重心における重力加速度と近似できるから⁶⁾、(7)は

$$\text{ZHD} = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_0}{f_{(\varphi, H)}} \quad (9)$$

$$f_{(\varphi, H)} = (1 - 0.0026 \cos \varphi - 0.00028H) \quad (10)$$

と表すことができる⁷⁾。 φ は観測地の緯度、 $H[\text{km}]$ は楕円体高である。ZHD(Zenith Hydrostatic Delay)は天頂静水圧遅延であり、乾燥空気による(一部水蒸気による影響を含む)遅延効果である。一方(4)の第2,3項はZWD(Zenith Wet Delay 以下ZWD)、天頂湿潤遅延量であり、水蒸気分子による遅延効果である。これらを合わせてZTD(Zenith Tropospheric Delay)、天頂大気遅延量と呼ぶ⁸⁾。

PWVは変換係数 Π を介してZWDと比例関係にあり⁹⁾、

$$\text{PWV} = \Pi \cdot \text{ZWD} \quad (11)$$

と示されている。ここで、変換係数は

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (12)$$

と表される。 $R_v[\text{J/K kg}]$ は水蒸気の気体定数であり、 $T_m[\text{K}]$ は水蒸気分圧で重み付けられた大気の荷重平均気温を表し、

$$T_m = \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz} \quad (13)$$

で定義される。

実際にはSaastamoinen(1972)モデルから天頂大気遅延量の初期値を計算し、仰角に依存するマッピング関数を用いて視線方向に投影したものを観測値から差し引く。差し引いた値は視線大気遅延残差であり、これは大半が湿潤遅延に相当する(気候学的モデルで説明できない遅延量の寄与も含まれている)。視線大気遅延残差と湿潤マッピング関数の偏微分係数を用いて、他の未知量とともに推定される。これに天頂大気遅延量の初期値を加えることでGPSの天頂大気遅延量とする。これに変換係数 Π を介してGPS-PWVを概算する。

2.3 RS-PWV (ラジオゾンデによる可降水量)

ラジオゾンデ可降水量は各気圧面における比湿の積算値で計算され、

$$w_{\text{top}} = \frac{100}{g} \times [q_{01}(p_s - p_1) + q_{12}(p_1 - p_2) + \dots] \quad (14)$$

$w_{\text{top}}[\text{kg/m}^{-2}]$ はラジオゾンデ可降水量(以下RS-PWV)、 $q_{01}, q_{12} \dots [\text{kg/kg}]$ は各気圧における比湿、 $p_s, p_1, p_2 \dots$

[hPa]は各高度における気圧を表している。

3. 観測の概要

3.1 観測地点

図-2 に示した星印の地点に GNSS 観測機器を設置した。GPS 観測の検証に利用した RS の観測サイトは札幌管区気象台(図-2 三角印)で、両観測サイトの直線距離は約 1.9km であった。



図-2 観測地点 [10]

3.2 観測期間

図-2 星印で行った GPS-PWV の観測期間は 2020 年 11 月 21 日から 12 月 9 日である。この期間の RS-PWV(9 時と 21 時の 1 日 2 回)との比較を 4.1 節で行った。

3.3 観測データ

気圧、気温は AMeDAS の 1 日の平均値を使用し、GPS-PWV の解析は 30 秒間隔で行った。RS 打ち上げ開始から終了までの 30 分間の平均値を算出して RS-PWV と比較した。

4. 解析結果

4.1 RS-PWV による GPS-PWV の検証

観測期間の中で GPS-PWV の最大値は 11.27mm で、最小値は 2.07mm となった。一方 RS-PWV の最大値は 12.98mm で最小値は 4.29mm であった。最大値をとった日は両者で同時刻となった。GPS-PWV と RS-PWV の全データの相関関係(図-3)は正の相関を示し、相関係数は 0.75 となった。二乗平均平方根誤差 RMSE は 1.52mm、平均差 MD は 0.24mm となった。昼間と夜間の RMSE を比較すると昼間の方が 0.01mm 大きい。MD も同様に昼間の方が 0.04mm 大きい。

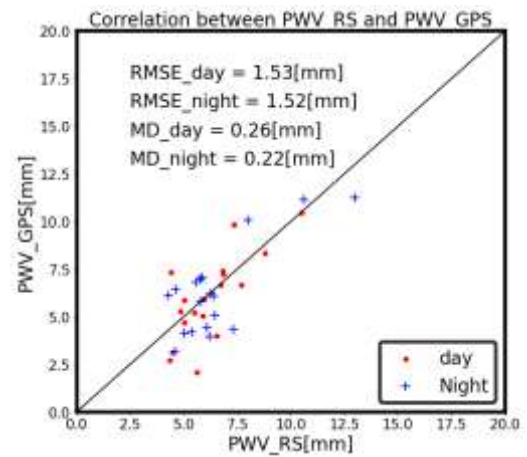


図-3 RS-PWV と GPS-PWV の昼間と夜間の比較
赤い点は昼間を示し、十印は夜間を示している。

4.2 GEONET 観測点との比較

冬の気圧配置は西高東低であり、筋状の雲が日本海側から流れ込む。その際、雲に覆われる地域と雲の隙間に差しかかる地域が存在する。図-5 より 2020 年 12 月 7 日の 13 時時点では北大、札幌両観測地点(図-2)の GPS で PWV が低くなり、雲がかかっていた他の地点ではやや高い。北大 GPS では 14 時頃から PWV が下がっており、14 時半過ぎには 2mm 以下となっている。一方、他の観測地点ではその時間に増加傾向にあり、雲の動きを見ると、北大 GPS 地点のみ雲がかかっていたいなかった。

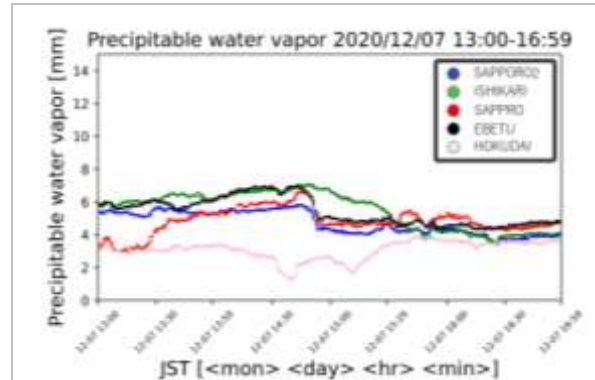


図-4 筋状の雲がみられた日の時系列
GPS は図-2 の星印、横軸は時間、縦軸は可水量

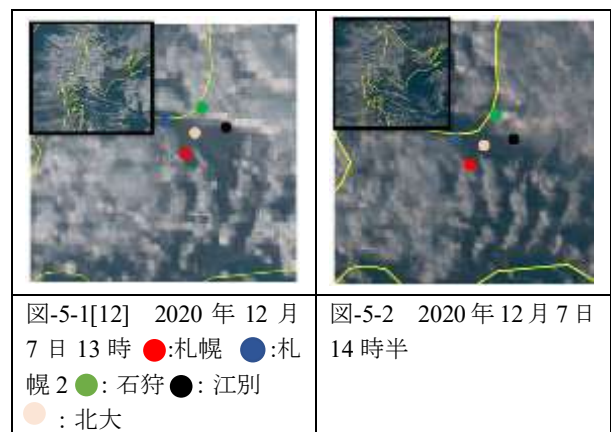


図-5-1[12] 2020 年 12 月 7 日 13 時 ●:札幌 ●:札幌2 ●:石狩 ●:江別 ●:北大

図-5-2 2020 年 12 月 7 日 14 時半

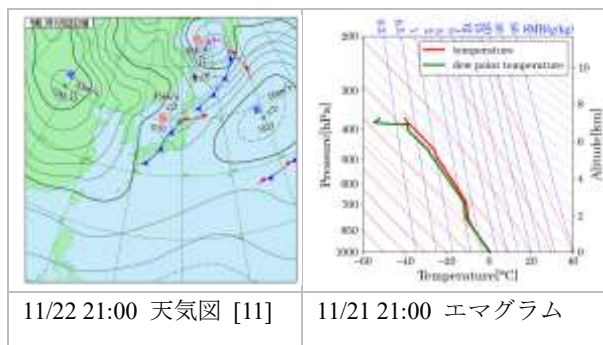
5. 考察及び今後の展望

観測期間内において GPS-PWV と RS-PWV の間には強い正の相関がみられた (図-3)。北海道大学に設置した観測点とラジオゾンデ観測点である札幌管区気象台の直線距離は約 1.9km であり観測点どうしが近い。GPS-PWV はアンテナを中心とした逆円錐が観測範囲であるのに対して、RS-PWV は観測点上空の積算値である。GPS-PWV の観測範囲の中に RS-PWV が含まれていたことが相関関係を強くしたのではないかと考える。観測期間で両者の PWV が最大となったときの気温は地上から約 3km 付近までほぼ露点温度と等しくなっており (図-4)、大気が湿っていたため PWV が大きかった。

ラジオゾンデの湿度計の日中の観測では、系統的な乾燥偏向がかかることが知られており、これは日中のアルベド量と関係があることが示唆されている⁴⁾。今回の観測では夜間の観測が日中の観測に比べて相関が強くなったが、顕著な差ではなかった (図-3)。

筋状の雲が内陸部に入り込んでいた日ではその雲がかかる地域と雲の隙間とで PWV の値に違いがでた。前者では PWV の値が後者との間で 4mm であった。雲が存在している領域では対流が生じている場合があり、地上風が収束し、周囲の水蒸気を取り込んでいる。そのため雲が存在しない場所では相対的に乾燥し、PWV に差が生じたと推測される。しかし、鉛直方向の気温勾配によっても雲中の水蒸気量は異なるため雲の有無のみで PWV の相対的な地域差を評価できない。

GPS 観測が高い精度で PWV を観測できることがわかったが、観測データ数が少ないため観測を続けて行く必要がある。また大気の水蒸気の積算値を観測することはできるが、その鉛直分布を知ることはできていないためその手法についても今後考えていく必要がある。GPS 観測において捕捉衛星の仰角を大きくしたとき、局所的な PWV になるのかということを検証していきたい。



謝辞：本研究の遂行にあたっては、挑戦的研究 (開拓) 20K20352 および科研費科研費基盤研究(A)19H00815 の支援を受けた。

参考文献

- 1) Wang, J. H., L. Y. Zhang, A. G. Dai, T. Van Hove, and J. Van Baelen (2007), A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, D11107,

doi:10.1029/2006JD007529.

- 2) Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using or estimation of the wet delay. *J. Geophys. Res.*, 97, 15787-15801.
- 3) M. Fujita, F. Kimura, K. Yoneyama, and M. Yoshizaki (2008), Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, VOL.35, L13803, doi:10.1029/2008GL033764
- 4) Voemel, H., H. Selkirk, L. Miloshevich, J. Valverde-Canossa, J. Valdes, E. Kyro, R. Kivi, W. Stolz, G. Peng, and J. A. Diaz (2007), Radiation dry bias of the Vaisala RS92 humidity sensor, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24(6), 953–963.
- 5) Thayer, G. D., An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9, 803-807, 1974.
- 6) Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rodgers, and G. Elgered, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, 20, 1593-1607.
- 7) Haas, R., G. Elgered, L. Gradinarsky, and J. Johansson (2003), Assessing Long Term Trends in the Atmospheric Water Vapor Content by Combining Data From VLBI, GPS, Radiosondes and Microwave Radiometry, Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, 16, 279-288.
- 8) Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using or estimation of the wet delay. *J. Geophys. Res.*, 97, 15787-15801.
- 9) Askne, J., and H. Nordius, 1987: Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.*, 22, 379-386.

西 修二郎 (2016), 衛星測位入門

- 10) 国土交通省 国土地理院: 「電子基準点データ提供サービス」

https://terras.gsi.go.jp/data_service.php#4/34.974185/138.750000/&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1

[最終閲覧日:2020年12月18日12時40分]

- 11) 気象庁: 「過去の天気図」

[気象庁 | 過去の天気図 \(1日表示\) \(jma.go.jp\)](http://jma.go.jp)

[最終閲覧日:2020年12月20日10時25分]

- 12) JAXA: 「JAXA ひまわりモニタ」

https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html

[最終閲覧日:2020年12月21日7時17分]