

〈特集〉

地上デジタル放送波を利用した水蒸気量観測手法とその展開

川村 誠治¹⁾, 花土 弘²⁾, 北井 信則³⁾, 比留間 利通⁴⁾

¹⁾情報通信研究機構 電磁波研究所
(〒184-8795 小金井市貫井北町4-2-1 E-mail: s-kawamura@nict.go.jp)

²⁾情報通信研究機構 電磁波研究所
(〒184-8795 小金井市貫井北町4-2-1 E-mail: hanado@nict.go.jp)

³⁾日本アンテナ(株) 経営戦略室
(〒335-0001 埼玉県蕨市北町4-7-4 E-mail: nobunori.kitai@nippon-antenna.co.jp)

⁴⁾日本アンテナ(株) 経営戦略室
(〒335-0001 埼玉県蕨市北町4-7-4 E-mail: toshimichi.hiruma@nippon-antenna.co.jp)

概要

水蒸気は気象レーダーでは観測できないが、雨の元となる水であるため、その動きをモニターすることは気象予測に非常に重要である。地上デジタル放送波の伝搬遅延をピコ秒の精度で計測することで、水蒸気量の変動を計測することができる。現在、観測装置を改良しながら、関東域で観測展開するとともに、線状降水帯をターゲットに九州での観測展開も始めている。日常の天気予報から災害予測まで有効な、地上デジタル放送波を利用した水蒸気量観測手法とその観測展開の現状について紹介する。

キーワード：水蒸気，豪雨予測，気象予測，地上デジタル放送，観測手法

原稿受付 2021.5.10

EICA: 26(1) 17-21

1. はじめに

近年豪雨災害が多発している。令和2年7月に熊本を中心に九州や中部地方など各地で発生した令和2年7月豪雨では梅雨前線が長期にわたり停滞して広い範囲で大雨となったが、7月上旬には九州で多数の線状降水帯が発生して記録的な大雨がもたらされた。平成30年7月に西日本を中心に発生した平成30年7月豪雨でも、線状降水帯によって継続した大雨が降り、広島や岡山で大きな被害がもたらされた。線状降水帯は、積乱雲が列をなして次々と発達し、数時間にわたってほぼ同じ場所を通過または停滞することで一定の地域に大雨の被害を引き起こす。また、近年都市部で頻発する局地的大雨（通称ゲリラ豪雨）などの時空間スケールの小さな気象現象は、孤立した積乱雲の急激な生成・発達により引き起こされる。このような豪雨災害の防災・減災を目指し、情報通信研究機構（NICT）では各種レーダー、ライダー（電波ではなく光を用いる。レーザーレーダー）等、雨・雲・風などを計測するリモートセンシング技術の研究開発を進めている。

平成30年3月から埼玉大学で観測を始めているマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）は、半径60kmの範囲の雨を30秒毎に定量三次元観測できる最新の降雨レーダーである。偏波を用いた定量観測と、フェーズドアレイによる高

速三次元観測が両立した同レーダーは、現況把握だけでなく、5～10分先の予測をするナウキャスト等でも有効性が高いことが示されている。スーパーコンピュータ等を用いた数値予報モデルにデータ同化することで、よりリードタイムの長い予測をする試みも行われている。

レーダーはある程度の大きさの粒子（雨滴や氷粒など）からの散乱を受信するため、粒子以前の水（＝気体である水蒸気）を観測することはできない。一方、大雨をもたらす積乱雲は、水蒸気が風で運ばれ、強い上昇気流で持ち上げられることで発生する。雨の元である水蒸気の動きを早い段階から連続して監視することにより、さらにリードタイムの長い、高精度の降雨予測が実現すると期待されるため、近年水蒸気の観測が重要視されている。本稿では、NICTが開発し¹⁾、NICTと日本アンテナ(株)が共同で実証実験を実施している地上デジタル放送波（地デジ放送波）を用いた水蒸気量推定技術を紹介する。

2. 水蒸気量の観測

水蒸気は、もともと観測が難しい物理量である。気温と気圧が分かれば、湿度を測ることで水蒸気量を知ることができるが、湿度計は安定して長期間高精度を保つことが難しいセンサーである。実際、気象

庁が全国展開しているアメダスにおいても、湿度を測定している観測点は非常に少ない。

水蒸気を測定する他の装置として、水蒸気ラジオメーター²⁻⁴⁾や水蒸気ライダー^{5,6)}があるが、一地点の高度方向の観測ができる一方、それぞれ高額な測定装置が必要となる。現在気象予報にも使われているのが、GPSをはじめとするGNSS信号を受信し、その伝搬遅延から鉛直積算の水蒸気量（GNSS可降水量）を測定する方法である⁷⁻¹¹⁾。水蒸気量の変化によって大気屈折率変動し、電波の伝搬速度が変わるために、その伝搬遅延量から水蒸気量を知ることができるのである。

本稿で紹介する地デジを用いた水蒸気量推定も、GNSS可降水量と同様に電波の伝搬遅延を用いる。GNSS観測が鉛直積算であるのに対し、本手法は水平方向に水蒸気の積算値を測定することができる。ゲリラ豪雨などの局所的な現象では地表面付近の水蒸気の振る舞いが重要と言われているが、本手法の観測対象は正にその地表面付近の水蒸気量である。本手法では高さ方向の情報は得られないが、鉛直方向に水蒸気量を測定するGNSS可降水量やマイクロ波放射計、水蒸気ライダーなどと組み合わせると気象予報の精度向上に寄与できると考えている。

3. 地デジ放送波を用いた水蒸気量観測

3.1 観測の原理

既に述べたように、降水粒子（雨粒や氷粒など）からの電波の散乱を受信する気象レーダーでは、気体である水蒸気量を観測できない。そこで本手法では、GNSS可降水量と同様に電波の伝搬遅延を用いる。電波は大気中の水蒸気量が増加すると伝搬速度が遅くなり、伝搬遅延を生じる。これは、伝搬経路長が実効的に伸びたのと等価である。この遅延量変化（もしくは実効伝搬経路長変化）を測定することで、伝搬経路上積算の水蒸気量の変化を知ることができる。本手法で使う電波は、電波塔から送信されている地上デジタル放送波である。

水蒸気量変化による電波の遅延量はどの程度の大きさか。距離1 kmの伝搬を考えた場合、その空間の湿度が1%上昇するときの電波の遅延量は、わずか3ピコ秒（ 3×10^{-12} 秒）程度である（気温25度、1気圧において）。これは1 kmの伝搬経路長が約1 mm伸びたのと等価である。つまり、伝搬遅延をピコ秒（ 10^{-12} 秒）の精度（距離にしてmmの精度）で計測して初めて水蒸気量の観測が可能となる。このわずかな遅延量測定を、地デジ放送の搬送波位相を測定することで実現する。

位置関係が固定されている送受信地点間を決まった周波数（波長）の放送波が伝搬する場合、受信電波の位相は常に一定になるはずである。水蒸気量変化によって実効伝搬経路長が伸び縮みするとその分だけ位相が回転するため、位相変化を測定することで遅延量変化が分かる、というのが基本的な考え方である。地デジ放送波の周波数は500 MHz帯なので波長は60 cm前後となり、その長さの波長の電波の位相変化を測定することで遅延量変化を求めることになる。ただし、実際に測定される位相変化には、水蒸気量変化によるもの以外に、放送局と受信機それぞれに用いられている局部発振器（基準クロック）の位相雑音も含まれる。通常は考慮する必要がないほど小さな位相雑音であるが、本件のようにピコ秒の精度での計測を目的としている場合にはその影響は大きい。位相雑音の変動は水蒸気量変化による位相変動に対して2~3桁程度も大きいため、これを打ち消さない限り水蒸気量変化が知ることができない。

3.2 観測の方法

位相雑音を相殺するために我々が現在採用している観測配置をFig. 1に示す¹⁾。測定点において、地デジ放送波の直達波と、後方からの反射波を同一装置で受信する（一つのアンテナで受信する場合には、強度の弱い反射波の方向にメインローブを向けるが、直達波と反射波それぞれを別のアンテナで受信し、その信号を合波して受信することもある）。直達波も反射波もその位相変化には伝搬経路上の水蒸気量変化成分以外

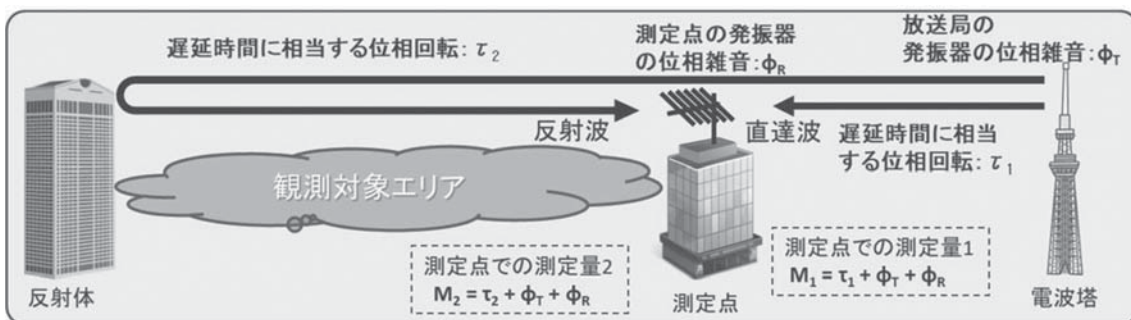


Fig. 1 地デジ放送波を用いて水蒸気量を推定するための観測配置（反射法）

に放送局の局部発振器の位相雑音 (Φ_T) と測定点の局部発振器の位相雑音 (Φ_R) が乗ってくるが、それらの位相雑音は全く同じものなので差を取ることで相殺され、測定点と反射体との往復の伝搬遅延が精度良く測定できる (反射法)。

地デジ放送波は、OFDM と呼ばれる方式で変調されている。約 6 MHz の帯域の中に 5617 本のキャリアが立ち、各キャリアは 64QAM などの変調信号で映像や音声情報を乗せている。伝搬による信号のひずみを補正するために、各キャリアには周期的に SP 信号と呼ばれる既知のパイロット信号が含まれており、本手法では、その SP 信号のみを抽出して遅延プロファイルを算出し、計測に用いている。

我々が制作し、現在関東域 18 地点で観測展開を進めているプロトタイプ観測装置の写真を Fig. 2 に示す。受信機をソフトウェア無線の技術を用いて制作したため、主要な構成要素は PC とソフトウェア無線用デバイス (USRP-N210) である。USRP-N210 には小型 GPS ボード (GPS 同期の水晶発振器) が入っており、これを局部発振器として利用している。水晶発振器は比較的位相雑音が大きいが、その位相雑音も反射法を使えばきれいに相殺される。システムの監視やデータ集約には携帯回線を利用し、そのためのルータなども合わせて一式をキャビネット (500×400×250 mm) に格納している。100 V の AC 電源を供給するだけで運用が可能である。

このプロトタイプ観測装置の信号処理部 (USRP-N210 と PC) を FPGA に置き換え、さらに小型化、低消費電力化、安定化を実現した観測装置の写真を Fig. 3 に示す。プロトタイプが 63 W 程度の電力を消費するのに対し、新しい装置の消費電力は最大 32 W 程度であり、また長期運用に耐え得る安定性を有している。同時観測により、新しい装置でもプロトタイプ観測装置と同じ観測結果が得られることが確かめられており、今後の観測展開ではこの新しい装置を用いて



Fig. 2 ソフトウェア無線の技を用いて制作されたプロトタイプ観測装置

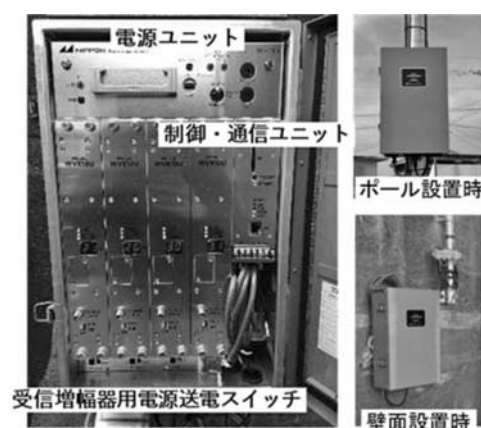


Fig. 3 FPGA を用いて小型化、低消費電力化、安定化を実現した新しい観測装置

いくことを考えている。

本手法は地デジ放送波を受信するだけで良い (送信は不要な) ため、装置を比較的小型・安価にできる点にメリットがある。また、受信装置としてアンテナやブースターなど安価な汎用品が利用できることも地デジ特有のメリットである。

市販の地デジ用アンテナで受信された信号は必要に応じて市販の地デジ用ブースターで増幅された後観測装置へ入力され、装置内で遅延プロファイルが導出される。遅延プロファイルは、電波塔から測定点まで様々な伝搬経路 (マルチパス) で伝搬する電波を遅延時間ごとに分離することができる。遅延プロファイル上で分離された各電波成分 (直達波や反射波) の位相を測定し、その変化から伝搬遅延変動を求めている。

3.3 観測例

NICT (東京都小金井市) で実施している観測の位置関係を Fig. 4 (a) に示す。Fig. 4 (a) 内の点線で囲まれた四角いエリアの拡大が Fig. 4 (b) である。東京スカイツリーから西方約 29 km に位置する R0 が NICT (測定地点) である。R1~R3 はそれぞれ遅延プロファイルからの遅延時間や反射波の到来方向から推定される反射体の位置を示している。測定地点 R0 において、直達波に加えて 3 つの反射波、合計 4 波の信号を受信することができる。これらの信号の位相差を算出することで、Fig. 4 (b) に示す 3 つのエリア (エリア 1~3) それぞれの伝搬遅延を導出することができる。得られた各エリアの伝搬遅延変動の一例 (プロトタイプ観測装置で取得、2016 年 3 月 16 日から 21 日まで約 4 日間の観測結果) を Fig. 5 に示す¹⁾。

Fig. 5 (a) では各エリアの伝搬遅延をプロットしている (1 km あたりの遅延量に換算、見やすくするためにエリア 2、エリア 3 のデータにはそれぞれ 50 ピコ秒、100 ピコ秒のオフセットを加えている)。エ

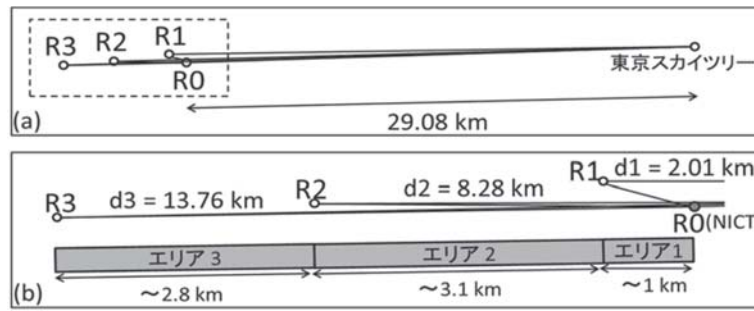


Fig. 4 NICT で実施している水蒸気量観測の位置関係

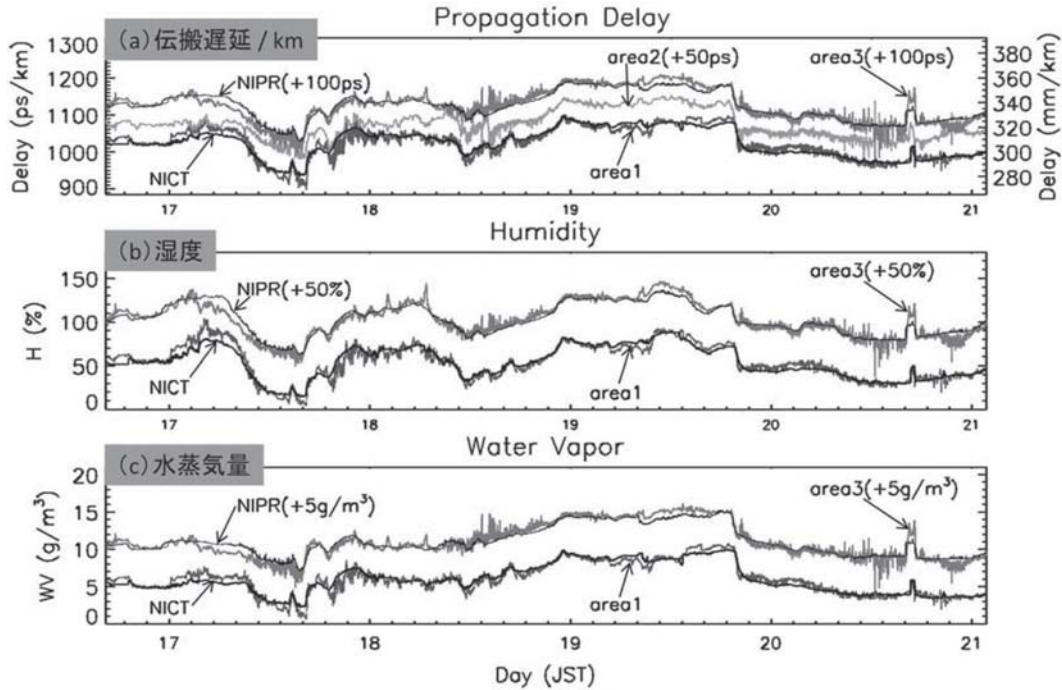


Fig. 5 地デジ放送波を用いた水蒸気量観測結果の一例

リア1及び3のラインに重ねている実線は、NICT及びR3近くの国立極地研究所(NIPR)における一地点観測で得られた地上気温、気圧、湿度から理論的に算出した1kmあたりの伝搬遅延である。一地点の地上気象観測値を1kmの間一定と過程して算出している。一地点観測から算出された計算値と1kmの積算である地デジ観測値は観測エリアが異なるため必ずしも一致する必要は無いのだが、それでも両者はそれぞれかなり良い一致を示しており、地デジを用いた観測が妥当な気象観測となっていることを示している。Fig. 5 (b) 及び (c) は地デジにより得られた伝搬遅延から、NICT及びNIPRの地上気温・気圧を用いて換算した湿度及び水蒸気量変化である。

4. 観測展開

関東域では、埼玉大学で運用されている最新の気象レーダーMP-PAWRの観測範囲と重なるように、プロトタイプ観測装置を用いて18地点に水蒸気量観測

網の展開を進めている(2021年4月現在)。基本的には東京スカイツリーからの地デジ放送波を利用するが、観測点によってはテレビ埼玉、テレビ神奈川、千葉テレビなどの東京スカイツリーと異なる電波塔からの地デジ放送波も受信可能なため、これらの場所では一地点のみの測定で複数の基線を用いた観測を行っている。

さらに、2021年度からは九州において線状降水帯をターゲットにした観測を予定しており、そのために現在九州北部に5地点(2021年4月現在)、Fig. 3に示す新しい観測装置を展開しており、2021年度さらに九州で観測地点を増やしていく予定である。

5. 日々の天気予報から災害時まで

現在の気象予報は、計算機上で様々な物理過程を取り入れた数値予報モデルを用いて時間発展を計算することで行われている。数値予報モデルを実際の状況に近付けるためになるべく多くの観測データを利用することが望ましく、それら観測データを数値予報モデル

へ取り込むことをデータ同化と呼んでいる。本手法で観測された水蒸気量もデータ同化に用いて、数値予報モデルの予測精度向上につなげることを目指している。現在地デジ観測のデータ同化実験を進めており、一地点の観測値を用いるだけでも降雨予測精度の改善が見られることが分かってきている。防災・減災への対応には、少なくとも20分以上のリードタイムを取った予測が必要と言われる。今後多地点観測のデータ同化を進め、20分から数時間先の豪雨等の予測精度向上を目指したいと考えている。

正確な水蒸気量のモニタリングは、災害時の防災・減災に役立つと同時に、日々の天気予報の精度向上にも有効である。日常から非日常までをシームレスにカバーする観測技術・システムの構築を目指したい。

6. おわりに

今後は、データ同化実験などを踏まえながら、九州の線状降水帯をターゲットとしてさらに観測地点を増やしていく予定である。反射波を用いる観測は、反射体となる建物の多い都市域では有効だが、山岳域など反射体となるものが少ないエリアでは不利となる。専用の反射体と設置する実験も行っているほか、反射波を用いない手法についても検討を進めたいと考えている。

水蒸気の測定だけが降雨予測の精度向上につながる訳ではない。水蒸気は風で運ばれ集められ、持ち上げられて雲を形成して雨をもたらす。雨につながるまでのプロセスには水蒸気以外にも風や気温など重要な気象要素があり、それらの観測も重要である。今後も環境計測を目的としたリモートセンシング技術の高度化を進めたい。本手法のように既存の電波を副次利用する技術は、電波資源の有効利用にもつながる。既存電波の散乱を利用したパッシブレーダなども視野に入れ、電磁波技術の高度化を進めていきたい。

謝辞

本件の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の第2期SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」「線状

降水帯の早期発生及び発達予測情報の高度化と利活用に関する研究」及び総務省から受託した「電波伝搬の観測・分析等の推進」の支援を受け行われている。

参考文献

- 1) Kawamura, S., et al. (2017), Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves, *Radio Sci.*, 52, doi: 10.1002/2016RS0061
- 2) Hogg, D. C., F. O. Guiraud, J. B. Snider, M. T. Decker, and E. R. Westwater (1983), A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 789-806.
- 3) Wei, C., H. G. Leighton, and R. R. Rogers (1989), A comparison of several radiometric methods of deducing path-integrated cloud liquid water. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6, 1001-1012.
- 4) Ware, R., R. Carpenter, J. Güldner, J. Liljegren, T. Nehr Korn, F. Solheim, and F. Vandenberghe (2003), A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Sci.*, 38, 8079, doi: 10.1029/2002RS002856.
- 5) Neely, R. R., J. P. Thayer (2011), Raman lidar profiling of tropospheric water vapor over Kangerlussuaq, Greenland, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28 (9), 1141-1148.
- 6) Browell, E. V., Wilkerson T. D., and McIlrath T. J. (1979), Water vapor differential absorption lidar development and evaluation, *Appl. Opt.*, 18(20), 3474-3483, doi: 10.1364/AO.18.003474.
- 7) 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 the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97(D14), 15,787-15,801.
- 8) Rocken, C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, and J. Johnson (1993), Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2631-2634, 1993.
- 9) Businger, S., S. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. Anthes, C. Rocken, R. Ware, T. Van Hove, and F. Solheim (1996), The promise of GPS in atmospheric monitoring, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 379-386.
- 10) Shoji, Y., H. Yamauchi, W. Mashiko, and E. Sato (2014), Estimation of local-scale precipitable water vapor distribution around each GNSS station using slant path delay, *SOLA*, 10, 29-33, doi: 10.2151/sola.2014-007.
- 11) Shoji, Y., W. Mashiko, H. Yamauchi, and E. Sato (2015), Estimation of local-scale precipitable water vapor distribution around each GNSS station using slant path delay: Evaluation of a severe tornado case using high-resolution NHM, *SOLA*, 11, 31-35, doi: 10.2151/sola.2015-008.