

2-4 地上デジタル放送波を用いた大気下層水蒸気量観測技術と台湾における観測実験

2-4 *Low-Level Atmospheric Water Vapor Observation Using Digital Terrestrial Broadcasting Waves (DTBW) and Its Field Experiment in Taiwan*

花土 弘 河谷 能幸 川村 誠治

HANADO Hiroshi, KAWATANI Yoshiyuki, and KAWAMURA Seiji

近年、局地的豪雨や線状降水帯による水害が頻発しており、大気中の水蒸気分布を高密度に観測する技術が求められている。NICTでは、地上デジタル放送波の伝搬遅延を利用した大気下層の水蒸気量観測技術を開発している。本稿では、台湾国家宇宙センター (TASA) および國立中央大學 (NCU) との共同研究として実施している台湾観測実験を紹介する。國立陽明交通大學 (NYCU) および國立臺北商業大學桃園キャンパス (NTUB) に構築した欧州方式対応観測システムによる連続観測の結果、反射波位相から推定した伝搬遅延量と地上気象観測値から算出した伝搬遅延量との間に高い相関 (相関係数0.972) が確認された。また、複数伝搬経路の比較から、水蒸気分布の空間構造を観測できる可能性が示された。今後は統合観測とデータ同化により短時間降水予測精度の向上を目指す。

Recent increases in localized heavy rainfall and quasi-stationary band-shaped precipitation systems have highlighted the need for high-density observations of atmospheric water vapor. NICT has developed a technique for observing lower-tropospheric water vapor using propagation delays of digital terrestrial broadcasting signals. This paper introduces field experiments conducted in Taiwan in collaboration with the Taiwan Space Agency (TASA) and National Central University (NCU). Continuous observations were carried out using instruments compatible with the European digital terrestrial broadcasting standard, installed at National Yang Ming Chiao Tung University (NYCU) and the Taoyuan Campus of National Taipei University of Business (NTUB). The estimated propagation delays derived from reflected-wave phases showed a strong correlation (correlation coefficient: 0.972) with delays calculated from surface meteorological observations. Comparison of multiple propagation paths also suggested the feasibility of observing the spatial structure of water vapor distributions. Future work includes integrated observations and data assimilation to improve short-term rainfall forecasts.

1 まえがき

近年、気候変動の影響に伴い、線状降水帯や局地的大雨による水害が頻発・激甚化している。こうした豪雨災害による被害を軽減し、社会のレジリエンスを向上させるためには、豪雨をもたらす積乱雲の発生・発達を早期に把握する観測技術が重要である。大気中の水蒸気は積乱雲の発達に直接関係する基礎的な気象要素であり、その時空間変動を高密度に観測することが求められている。

NICTでは、国内に整備された地上デジタル放送網を活用し、放送波の伝搬遅延量を高精度に測定するこ

とで大気下層の水蒸気量を推定する新しい観測技術を開発している。本技術は、既存の情報通信インフラを利用するため広域展開が容易であり、気象レーダや気象衛星など既存の観測システムを補完する水蒸気観測手段として、豪雨災害の予測・検知能力の向上への貢献が期待される。

これまで日本の地上デジタル放送方式 (ISDB-T) を利用した観測技術の研究開発を進めてきたが、近年、新たに欧州方式 (DVB-T) に対応した観測装置を開発した。これにより、日本国外への適用が可能となり、2025年から台湾國立中央大學 (National Central University) と共同で台湾における観測実験を開始し

た。本観測実験は、台湾国家宇宙センター (TASA) と NICT の研究協力プロジェクトの一環として実施されており、台湾における水蒸気量の連続観測と豪雨発生メカニズムの解明ならびに豪雨予測精度向上への活用を目指している。本稿では台湾における観測システムの構築および初期観測結果について紹介する。

2 地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定手法

2.1 背景

近年頻発している局地的な豪雨は、活発な積乱雲によって引き起こされることが多く、その発生や発達を予測することは、防災・減災にとって極めて重要である。降雨を直接観測する手段として、気象レーダ技術の高度化も進められている。NICTでは、従来の気象レーダに比べて大幅に高速な三次元観測を実現するフェーズドアレイ気象レーダ (PAWR) を開発し、積乱雲の急速な発達過程や竜巻を伴う危険な気象現象の詳細な観測を可能にした [1][2]。さらに近年では、フェーズドアレイ気象レーダの高速三次元観測能力と、マルチパラメータレーダが有する高精度な降水観測能力を兼ね備えたマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ (MP-PAWR) の研究開発を実施した [3][4]。

このような先進的なレーダ技術は、発達した雨雲の構造や移動を高精度に捉えることができる一方で、積乱雲が発生する前の大気中の水蒸気分布を直接観測することは容易ではない。積乱雲のライフサイクルは数十分から1時間程度と短く、降雨の予測時間を延ばし、その精度を向上させるためには、雨粒 (液体の水) へと成長する前の水蒸気 (気体の水) の分布や変動を把握する必要がある。しかし、水蒸気は大気中で最も時空間変動の大きい気象要素の1つであり、高密度かつ連続的な観測は容易ではない [5]。そのため、豪雨の更なる早期予測を実現するためには、雨雲そのものの

監視に加えて、水蒸気の変動を広域に観測する新たな技術が求められている。

GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) 観測は、測位衛星から送信されるLバンドの電波の大気伝播遅延を観測し、その遅延量から大気中の可降水量を推定する手法であり、現在では気象庁の数値予報システムにおけるデータ同化にも利用されている [6]。NICTでは、この電波伝搬遅延による水蒸気量推定の考え方を地上デジタル放送波へ拡張し、UHF帯 (470~710 MHz) の放送波の伝搬遅延量を高精度に測定することで、大気下層の水蒸気量を観測する技術を開発した [7][8]。

2.2 原理

電磁波は、伝搬経路上の物質の影響を受けて速度が低下するため、真空中と比べて伝搬にわずかな遅れが生じる。地表付近の大気では、この伝搬遅延量は気圧、気温、水蒸気量によって変化する。対流圏における屈折指数 N^* は、乾燥空気および水蒸気の寄与を用いて次式で表される。

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2} \quad (1)$$

ここで、 P_d, P_v はそれぞれ乾燥空気および水蒸気 の分圧 (hPa)、 T は絶対温度 (K) である。また、 k_1, k_2, k_3 は定数であり、それぞれ、77.6 [K/hPa]、70.6 [K/hPa]、 3.739×10^5 [K²/hPa] の値を取る [9]。式 (1) 右辺の第1項が乾燥大気の寄与で、第2項と第3項が水蒸気の寄与である。気象庁アメダス東京のデータ (気圧・気温・相対湿度) に式 (1) を用いて算出した、1 kmあたりの大気による伝搬遅延量の変化 (2023-2025の3年間) を図1に示す。下の青線が水蒸気による遅延量 (湿潤成分) であり、冬季には小さく、夏季には大きくなり、およそ20~500 psec/kmの範囲で変動する。一方、中央の赤線は気圧に主に依存する乾燥大気による遅延量 (乾燥成分) で、水蒸気成分とは逆に冬季に大きく、夏季に小さくなり、約800~1,000 psec/kmの範囲で変動する。上の緑線は両者を加えた全伝搬遅延量であり、地表付近の大気による遅延量は年間を通じておよそ1,000~1,300 psec/kmの範囲で変化する。図1より、水蒸気による遅延量 (青線) は全伝搬遅延量 (緑線) の一部であるが、その変動幅は大きく、地表付近の水蒸気量の変化を反映していることが分かる。したがって、

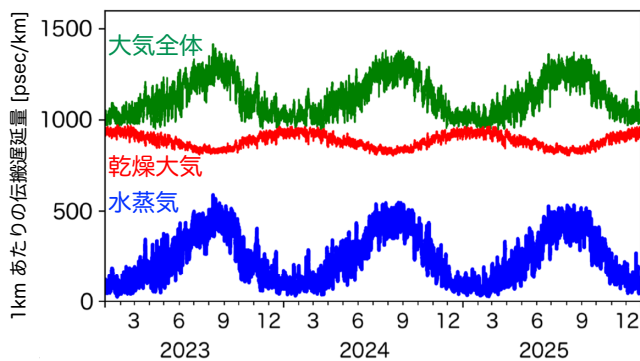


図1 気象庁アメダス東京の気圧・気温・相対湿度データから算出した1 km 当たり的大気伝搬遅延量 [psec/km] の変化 (2023-2025の3年間) 上 (緑線) : 大気全体、中 (赤線) : 乾燥大気、下 (青線) : 水蒸気

* 1 屈折指数 N : 電波領域における大気の屈折率 n は地上付近で通常、1.0003程度であり、対流圏における変動は 10^{-4} のオーダー以下と非常に小さく、この変動分を詳細に表すために

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (2)$$

で定義される屈折指数が用いられることが多い。

伝搬遅延量をピコ秒オーダーの精度で測定できれば、地表付近の水蒸気量の変動を捉えることができる。

このような高精度な伝搬遅延測定に地上デジタル放送波に含まれるSP (Scattered Pilot) 信号を利用する。地上デジタル放送では複数のサブキャリアに情報を分散して送信するOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重) 方式が用いられている。SP信号は、そのOFDM信号の各シンボル内に既知信号として散在配置された基準信号であり、受信チャンネルの周波数応答を推定するために用いられる。受信信号から推定された周波数応答に逆フーリエ変換を適用することで、電波の伝搬経路ごとの到来時間と受信強度を表す遅延プロファイルを得ることができる。

図2に、首都圏の複数の観測点で取得した遅延プロファイルを示す。横軸は遅延時間 (上側軸は送信点からの換算距離)、縦軸は受信電力を表す。遅延時間0 μ secに見られるピークは送信局から到来する直達波に対応している。その後、約1~60 μ sec (換算距離で約0.15~9 km) の範囲において、建築物や地形などによる反射波が多数観測される。これらの反射成分の到来時間や強度は周辺の伝搬環境に依存している。

図3および4に、地上デジタル放送波を用いた水蒸気

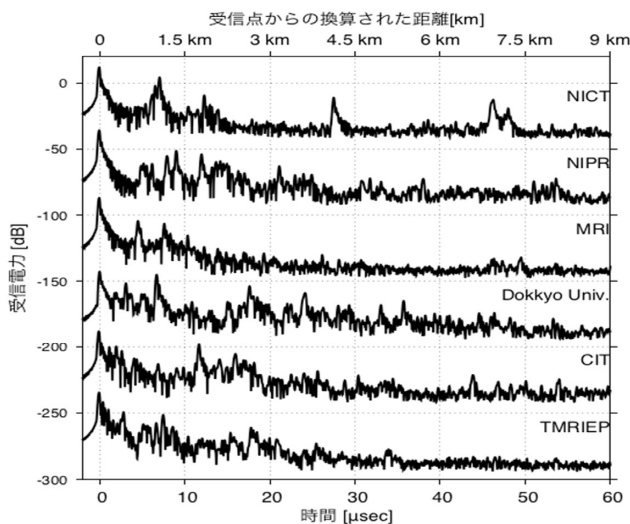


図2 首都圏の観測点で取得された遅延プロファイルの例

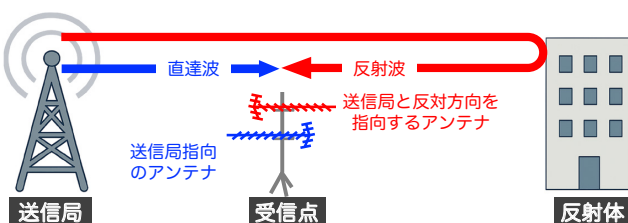


図3 送信局、受信点および反射体の配置概要

量推定手法 (反射法) の概要を示す。図3は、送信局、受信点および反射体の位置関係を模式的に示したものである。受信点には、送信局方向を指向して直達波を受信するアンテナに加え、送信局とは反対方向を指向するアンテナを設置し、その方向に存在する建築物などの反射体から到来する反射波を同時に受信する。

受信した地上デジタル放送波に含まれるSP信号を用いて複素遅延プロファイルを求めることで、直達波および反射波に対応するピークの振幅と位相を取得することができる。図4に示すように、直達波のピーク位相には送信局の位相雑音、送信局から受信点までの伝搬位相および受信装置の位相雑音が含まれる。一方、反射波のピーク位相には送信局の位相雑音、反射波の伝搬位相および受信装置の位相雑音が含まれる。ここで、反射波のピーク位相から直達波のピーク位相を減算すると、送信局および受信装置に起因する位相雑音に加え、送信局から受信点までの共通の伝搬位相成分が相殺される。その結果、受信点と反射体の間を往復する伝搬路に対応した位相変化のみを高精度に抽出することができる。この位相変化は伝搬路上の大気屈折率、特に水蒸気量の変動に強く依存するため、その時間変化を連続的に観測することで経路平均の水蒸気量変動を推定できる。これが本手法 (反射法) によって高精度な伝搬遅延測定を実現する原理である。

なお、実際に観測される伝搬路は受信点と反射体との間の往復区間であり、観測には受信点から数百 m 程度の近距離の反射体から十数 km離れた反射体まで利用されている。

2.3 日本国内での観測実験について

NICTは、東京スカイツリーを送信局とした首都圏観測実験を国立極地研究所および気象研究所で共同で実施し [7]、SIP第1期「レジリエントな防災・減災機能の強化」[10]の一環として、板橋区 [11]、千葉工業大学、東京科学大学および日本アンテナ株式会社で実施した。得られた観測データについては京都大学と共同で解析

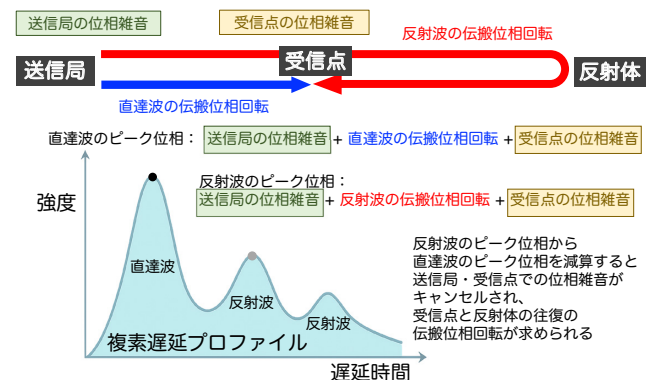


図4 直達波と反射波の位相差を利用した高精度伝搬遅延測定 (反射法) の原理

を進める [12]とともに、山梨大学との連携により京阪神地区へ観測エリアを拡大した [13]。その後、SIP第2期「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」における線状降水帯予測技術開発 [14][15]の一環として、日本アンテナと協力して首都圏観測網（最大10地点）を構築し、さらにFPGAを用いた屋外設置型観測装置を開発して九州地方へ展開し、最大15地点からなる観測網を拡充し、観測量の検証およびデータ同化に向けたドローン同時観測実験 [16]を実施した。

3 台湾での観測実験

3.1 観測システムの構築

台北市における局地豪雨の予測に向けて、地上デジタル放送波を利用した水蒸気量観測装置2式の設置場所について、国立中央大学の楊舒芝教授および王聖翔教授と検討を行った（図5）。その結果、図6に示す3地点において遅延プロファイルの観測を実施した。

国立陽明交通大学（NYCU）および中國文化大學（CCU）では、台北市北部の竹子山山頂付近に位置する送信局から放射される地上デジタル放送波を利用し、台北市中心部の建築物等で反射した反射波を受信することで、台北盆地内の水蒸気量変動の観測を行うことを目的とした。一方、國立臺北商業大學桃園キャンパス（NTUB）では、桃園市南西部に位置する送信局からの放送波を利用し、桃園市中心部からの反射波を受信することで、台北盆地へ西側から流入する水蒸気量変動を観測することを目的とした。図6において、▲は送信局、●は受信点を示している。各受信点で観測される反射波は、図中の楕円で示した領域を通過する伝搬経路に対応しており、その経路に沿った水蒸気量の時間変動を高時間分解能で観測することができる。



図5 国立中央大学との水蒸気量観測地点選定に関する検討の様子

図7に、3つの観測地点において中心周波数 557 MHz で取得した遅延プロファイルを示す。上段は國立臺北商業大學桃園キャンパス（NTUB）、中段は國立陽明交通大学（NYCU）、下段は中國文化大學（CCU）で取得した結果である。縦軸は受信信号強度、横軸は遅延時間（ μsec ）を表している。また、上側の横軸には遅延時間を受信点から反射体までの距離に換算した値を示している。いずれの観測地点においても、遅延時間 0 μsec 付近には送信局から直接到来する直達波による顕著なピークが観測される。本観測では、この直達波を位相の基準として利用し、それより 20~40 dB 程度弱い反射波ピークの位相変化を解析することで伝搬遅延量を求め、さらに大気中の水蒸気量変動を推定する。

NTUBで取得された遅延プロファイルでは、比較

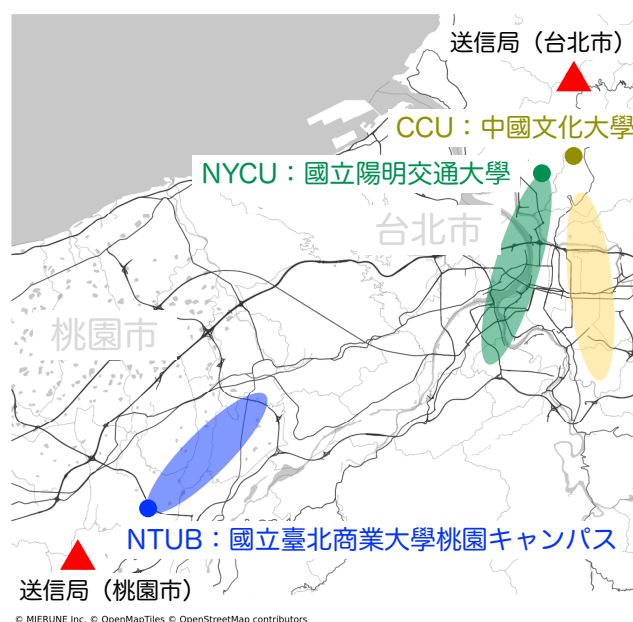


図6 台北盆地および桃園市周辺における観測地点（●）、送信局（▲）および観測対象領域
（背景地図：© OpenStreetMap contributors） [17]

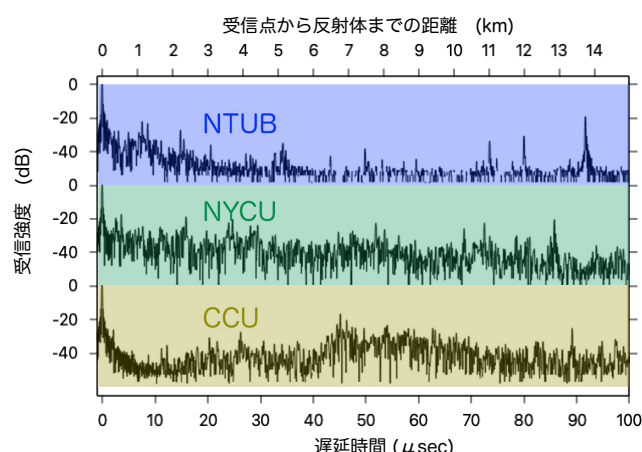


図7 NTUB、NYCUおよびCCUにおいて中心周波数557 MHzで取得した遅延プロファイル

強い反射波が遅延時間 $50 \mu\text{sec}$ 以下(反射体までの距離で約7.5 km以内)に集中して観測されている。これは、桃園市が台北市と比較して市街地の広がり小さく、遠方に強い反射体が少ないためと考えられる。一方で、反射体までの距離に換算して約11 km、12 km および14 km付近に比較的強いピークが確認される。これらのピークは位相が短時間で大きく変動することから、桃園市南西部の送信局からの反射波ではなく、同一周波数を利用する別の送信局(台北市周辺の送信局など)から到来する信号である可能性が高い。地上デジタル放送ではOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重)方式が採用されており、マルチパス伝搬に対して高い耐性を有する。この特長を利用して、台湾ではSFN (Single Frequency Network: 単一周波数ネットワーク)が広く構築されており、複数の送信局が同一周波数で同期して同一内容の放送を行っている。そのため、観測地点では複数の送信局からの信号が同時に受信される場合がある。一方、台北市北部に位置するNYCUおよびCCUで取得した遅延プロファイルでは、反射体までの距離に換算して最大15 km程度まで顕著な反射波ピークが確認される。特にNYCUでは、受信点近傍から遠方に至るまで連続的に反射波ピークが分布している。一方、CCUでは遅延時間 $20 \mu\text{sec}$ 以下(反射体ま

での距離で約3 km以内)の範囲に顕著な反射波ピークがほとんど存在しないという特徴が見られる。

この違いは、両観測地点の周辺環境の違いによるものと考えられる。図8に示すように、NYCUは山麓部に位置しており、その南側には台北市中心部の市街地が広がっているため、受信点近傍から遠方まで連続的に建物による反射波が観測される。一方、CCUは台北市北部の山腹に位置しており、台北市街地との間に山地が広がっている。そのため、受信点近傍には顕著な反射体となる建築物が少なく、遅延時間 $20 \mu\text{sec}$ 以下の範囲に明瞭な反射波ピークが現れないと考えられる。このNYCUとCCUでの遅延プロファイル上の反射体分布の違いから、NYCUに観測装置を設置することとした。図9にNTUB, NYCUにおける水蒸気量観測装置のアンテナおよび地上気象観測装置の設置風景を示す。

3.2 初期観測結果

図10および図11に、国立臺北商業大學桃園キャンパス(NTUB)および国立陽明交通大學(NYCU)において取得された初期観測結果を示す。観測期間は2025年11月22日から12月3日までである。横軸は観測時刻、縦軸は単位距離当たりの伝搬遅延量 [psec/km]を示す。各図では、4枚の受信ボードで受信した異なる周波数(533, 545, 557, 569 MHz)の観測結果を、それぞれ青、緑、赤、マゼンタで表示している。また、各パネルは遅延プロファイル上の反射波ピークを受信点からの遅延時間順に配置しており、上段ほど受信点に近い反射体、下段ほど遠方の反射体に対応する。

反射波位相には反射体までの伝搬距離に起因する不定性が含まれるため、受信点に設置した地上気象観測装置で取得した気圧、気温および相対湿度から算出した伝搬遅延量と比較し、位相オフセットを決定した。各図では、この気象観測値から算出した伝搬遅延量を

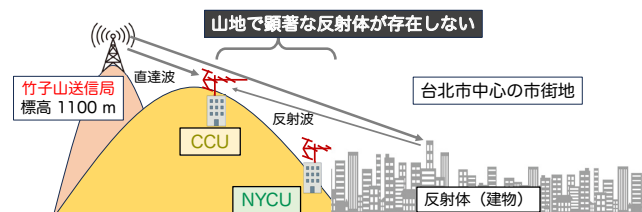


図8 NYCUとCCUにおける反射波分布の違いを生じる要因の模式図(地形および反射体分布の比較)



図9 NTUB, NYCUでの水蒸気量観測装置用アンテナおよび地上気象観測装置の設置風景
(左: 国立臺北商業大學桃園キャンパス (NTUB)、右: 国立陽明交通大學 (NYCU))

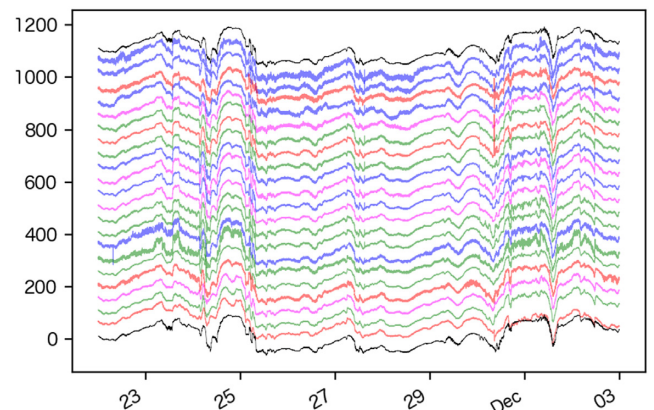


図10 NTUBにおいて観測された各反射波の単位距離あたり伝搬遅延量 [psec/km] の時間変化 (2025年11月22日~12月3日)

参照値として、最上段および最下段に黒線で示している。

図10に示すNTUBの観測結果では、各反射波ピークの位相から求めた伝搬遅延量は、受信周波数の違いによらずおおむね類似した時間変動を示している。また、その変動傾向は受信点の気圧、気温および相対湿度から算出した伝搬遅延量ともおおむね一致している。一方で、変動の詳細に着目すると、反射波ピークの遅延時間、すなわち反射体までの伝搬経路長に応じて伝搬遅延量の変動形状に差異が認められる。図12には、2025年11月24日から25日にかけての約2日間のデータを拡大して示す。図の右に、反射波ピークの受信点からの距離を遅延時間から換算し示す。24日12時頃から25日2時頃にかけて伝搬遅延量の顕著な増加が観測されるが、その時間変化は反射波ピークごとに異なっている。受信点に近い反射体に対応する反射波ピークでは、増加過程の中央部に見られるくぼみが小さく継続時間も短いのに対し、遠方の反射体に対応する反射波ピークでは、くぼみがより顕著となり継続時間も長くなる傾向が認められる。また、増加開始時刻および減少開

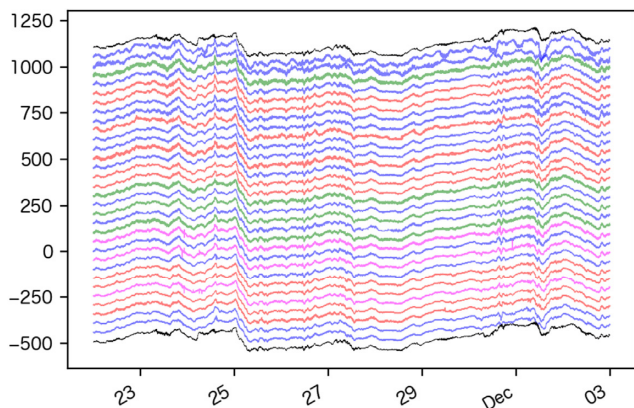


図11 NYCUにおいて観測された各反射波の単位距離あたり伝搬遅延量 [psec/km] の時間変化 (2025年11月22日～12月3日)

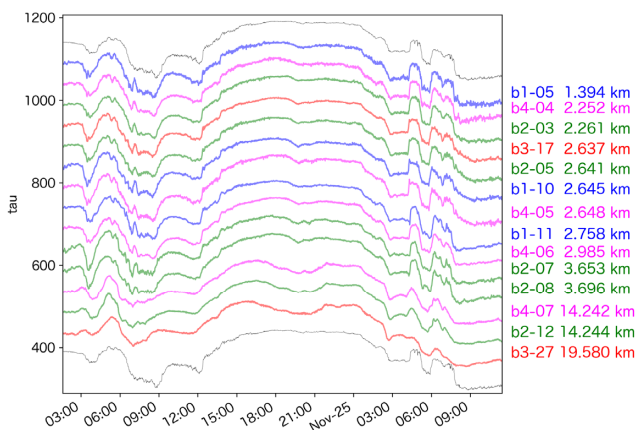


図12 NTUBにおいて観測された各反射波の単位距離あたり伝搬遅延量 [psec/km] の時間変化 (2025年11月24日から25日: 図10の時刻の一部を拡大)

始時刻にも反射波ピーク間でわずかな差異が確認できる。これらの差異は、各反射波が異なる伝搬経路を通過していることに起因すると考えられる。すなわち、水蒸気量の増加をもたらした大気現象が観測領域全体に様に存在していたのではなく、受信点から反射体までの経路に沿って空間的な分布や時間発展が異なっていた可能性を示している。特に遠方の反射体に対応する経路ほど、受信点近傍では捉えられない水蒸気変動の影響を含むため、変動の振幅や継続時間に差が現れたものと考えられる。

この結果は、本手法が受信点近傍の点的な水蒸気量変動ではなく、本手法が受信点と反射体を結ぶ伝搬経路に沿った水蒸気量変動を捉えていることを意味し、反射波ごとの伝搬遅延量の違いを利用することで、大気下層における水蒸気分布の水平構造やその時間変化を推定 [18] できる可能性が示唆される。

これに対し、図11に示すNYCUの観測結果では、各反射波ピークの変動はNTUBと同様に受信周波数によらず高い一致性を示し、また反射体までの距離に応じた変動形状の違いも確認できる。しかし、その変動はNTUBに比べて空間的により一様であり、反射波ピークの受信点からの距離による差異は比較的小さい。NTUBでは11月24日から25日にかけて顕著な増加および減少過程が観測され、反射体までの距離に応じた時間変化の違いが明瞭に現れているのに対し、NYCUでは期間全体を通じてより滑らかな変動を示している。この違いは、両地点における観測経路上の水蒸気分布やその時間変動の空間的不均一性の違いを反映している可能性がある。

次に、地上気象観測装置で観測された気圧、気温および相対湿度から算出される伝搬遅延量と、反射波ピークの位相変動から求められる伝搬遅延量との対応を評価するため、NYCUにおける受信ボード#2 (周波数545 MHz) の遅延時間60.222 μ s (受信点から約

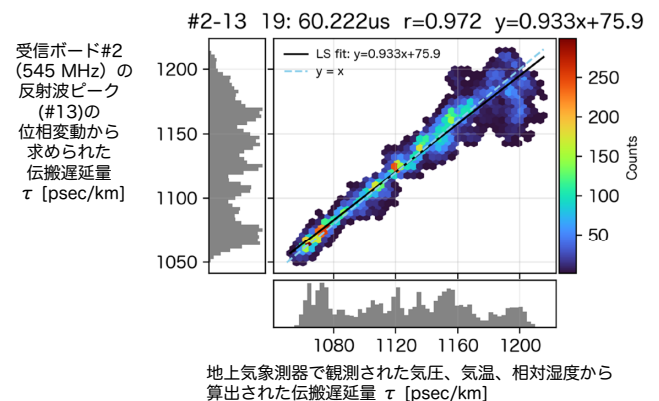


図13 NYCUにおける地上気象観測値から算出した伝搬遅延量と反射波位相変動から推定した伝搬遅延量との散布図 (受信ボード#2、545 MHz、遅延時間60.222 μ s)

9.03 kmに相当する反射体)に対応する反射波ピークについて、両者の散布図を図13に示す。図13より、反射波位相から求められた伝搬遅延量と地上気象観測値から算出した伝搬遅延量との間には強い正の相関が認められ、相関係数は0.972であった。また、最小二乗法による回帰直線の傾きは0.933であり、1に近い値を示している。このことから、地上デジタル放送波の位相変動から推定される伝搬遅延量は、地上気象観測から求められる伝搬遅延量の時間変動を良好に再現していることが分かる。一方で、伝搬遅延量が大きい領域ではデータのばらつきがやや増加し、地上気象観測値から算出される伝搬遅延量に対して、地上デジタル放送波から推定される伝搬遅延量が相対的に小さくなる傾向が認められる。この傾向は、回帰直線の傾きが1よりも小さいことにも対応している。

この差異は観測誤差のみに起因するものではなく、両手法が観測対象とする空間の違いを反映している可能性がある。地上気象観測装置による伝搬遅延量は受信点近傍の地表付近における点観測から算出されるのに対し、地上デジタル放送波による推定値は、送信局、反射体および受信点を結ぶ伝搬経路に沿った空間平均的な値を表している。また、伝搬経路は地表から数十 m 程度上空を通過するため、受信点近傍の地表面付近とは異なる大気層の影響を受ける。このため、水蒸気量が多い場合ほど、地表付近と伝搬経路上との鉛直方向・水平方向の分布差が現れ、図13にみられる系統的な差異として現れている可能性がある。それにもかかわらず、両者の相関係数が0.972と極めて高いことから、地上デジタル放送波を用いた手法は大気下層の水蒸気量変動を高い精度で捉えていると考えられる。

4 今後の展望

台湾における初期観測の結果から、台湾で利用されている欧州方式の地上デジタル放送波を利用して、台北盆地およびその周辺域における大気下層の水蒸気量

変動を連続的に観測できることが確認された。台湾北部は台北盆地を取り囲む複雑地形の影響を強く受けるため、局地的な水蒸気分布や急激な時間変化が積乱雲の発生と密接に関係していると考えられる。今後は、豪雨をもたらす午後の対流活動との関係解明および数値予報への活用を目指し、観測網の拡張と総合的な解析を進める(図14)。

4.1 観測網の拡張と統合観測

2026年度以降、NICTは台湾国立中央大学(NTU)と連携し、既設の国立陽明交通大学(NYCU)および国立臺北商業大学桃園校區(NTUB)に加え、さらに1~2地点に地上デジタル放送波(Digital Terrestrial Broadcasting Waves: DTBW)による水蒸気量観測装置を設置し、台北盆地周辺における下層水蒸気分布の面的観測を進める予定である。また、NCUではGNSS観測による天頂遅延量(ZTD)および大気勾配、地上気象観測、移動観測、UAV観測、さらにはGNSS電波掩蔽観測(FORMOSAT-7/COSMIC-2)を組み合わせた統合観測網の構築を進めている。さらに、夏季の午後対流事例を対象とした集中観測実験(IOP)を実施する計画である。UAV観測についてはNCUを拠点とし、雷雨発生日において高度約1,100 mまでの大気下層の水蒸気量および鉛直構造を観測する。また、竹子山送信所とNTUBを結ぶ伝搬経路上に気象観測タワーを設置するとともに、桃園市を東西に横断する台66線(東西向快速公路觀音大溪線)沿いで移動観測を実施し、水蒸気量の空間分布を観測する予定である。これらの観測により、DTBWが観測する伝搬経路上の水蒸気量変動と実際の気象構造との対応関係を評価するとともに、台北盆地における水蒸気の流入過程や空間分布の特徴を明らかにする。さらに、DTBW観測、GNSS観測、地上気象観測およびUAV観測から得られる水蒸気情報を相互比較し、各観測手法の空間代表性の違いを整理する。加えて、DTBW観測に対する水蒸気鉛直勾配の影響や、対流発生前の水蒸気増加に対する感度を評価し、局地的な水蒸気蓄積と上流域からの水蒸気輸送が雷雨発生に与える影響を解析する。

4.2 数値予報への応用

最終的には、DTBW観測データの数値予報モデルへのデータ同化を実施し、短時間降水予測への有効性を評価する。まずは地上気象観測とDTBW観測を用いた同化実験を行い、その後GNSS観測およびUAV観測を組み合わせた高解像度データ同化実験へ発展させる予定である。

また、2027年夏季に計画されている台湾・米国共同観測プロジェクト PROBE (PBL Research and

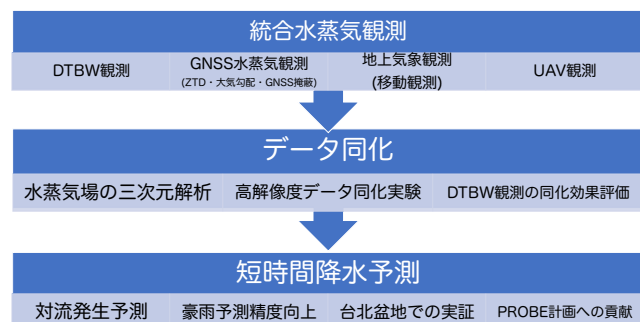


図14 統合水蒸気観測からデータ同化・短時間降水予測へ至る研究計画の概念図

Observations for Basin Extreme-precipitation) との連携も視野に入れ、台北盆地における極端降水事例を対象として、大気境界層内の水蒸気観測の高度化とデータ同化効果の検証を進める。これにより、DTBW観測の数値予報への有効性を定量的に評価し、豪雨予測精度向上への貢献を目指す。

5 むすび

本稿では、地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定技術の概要と、台湾における観測実験について紹介した。NICTでは、電波の伝搬遅延量から大気下層の水蒸気量変動を推定する技術を開発しており、従来のGNSS観測では捉えにくい都市域や沿岸域における高密度な水蒸気観測の実現を目指している。台湾国家宇宙センター(TASA)および国立中央大学(NTU)との連携の下、国立陽明交通大学(NYCU)および国立臺北商業大学桃園校区(NTUB)に観測システムを構築し、地上デジタル放送波を利用した連続観測を開始した。その結果、地上気象観測値から算出した伝搬遅延量と、反射波位相から推定した伝搬遅延量との間には高い相関が認められ、本手法によって大気下層の水蒸気量変動を高精度に捉えられることが確認された。また、反射体までの距離が異なる複数の伝搬経路において、水蒸気量変動の時間変化に差異が認められた。この結果は、本手法が単一地点における水蒸気量を観測するだけでなく、複数伝搬経路の比較により、水蒸気分布の空間構造やその時間変化を捉えられる可能性を示している。特に、台北盆地周辺の複雑地形下における水蒸気輸送や局地的な水蒸気の蓄積過程を把握するための新しい観測手段として期待される。今後は、観測地点の拡充および統合観測網の構築を進めるとともに、GNSS観測、UAV観測および地上気象観測との比較解析を通じて、本手法の観測特性をさらに明らかにする予定である。さらに、数値予報モデルへのデータ同化実験を通じて、豪雨をもたらす積乱雲の発生予測や短時間降水予測への有効性を検証し、将来的には豪雨災害の軽減に貢献することを目指している。

謝辞

本研究における台湾での地上デジタル放送波を用いた水蒸気量観測の実施にあたり、国立中央大学の楊舒芝教授、王聖翔教授をはじめ、教職員および学生の皆様に多大なるご支援とご協力をいただいた。また、試験観測および本観測の実施に際しては、国立陽明交通大学、国立臺北商業大学、中國文化大学、桃園市平鎮区東勢国民小学の関係者の皆様に多大なるご協力を

いただいた。台湾に設置した欧州方式対応地上デジタル放送波水蒸気量観測装置の開発にあたっては、日本アンテナ株式会社および株式会社ソシオネクストのご支援をいただいた。特に、台湾での試験観測の実施および観測装置の設置・調整作業においては、渡辺 琢也氏(当時、日本アンテナ株式会社)に多大なるご助力をいただいた。また、台湾への観測機材の輸出手続きにおいては、リモートセンシング研究室の三森 麻衣子氏に多大なるご支援をいただいた。ここに記して深く感謝申し上げる。

【参考文献】

- 1 佐藤晋介, 牛尾知雄, 水谷文彦, “フェーズドアレイ気象レーダの研究開発,” NICT NEWS 2013年1月号 no.424, pp.3-5, 2013.
- 2 F. Mizutani, T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, “Fast-scanning phased-array weather radar with angular imaging technique,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 56, pp.2664-2673, 2018. doi: 10.1109/TGRS.2017.2780847.
- 3 N. Takahashi, T. Ushio, K. Nakagawa, F. Mizutani, K. Iwanami, A. Yamaji, T. Kawagoe, M. Osada, T. Ohta, and M. Kawasaki, “Development of Multi-Parameter Phased Array Weather Radar (MP-PAWR) and Early Detection of Torrential Rainfall and Tornado Risk,” Journal of Disaster Research, vol.14, no.2, pp.235-247, March 2019.
- 4 花土弘, 高橋暢宏, 中川勝広, 佐藤晋介, 川村誠治, 岩井宏徳, “偏波化されたフェーズドアレイ気象レーダー (MP-PAWR) 開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.1, pp.3-8, 2019.
- 5 小司禎教, “水蒸気観測技術の発達とこれから,” 天気, vol.50, no.10, pp.885-888, 2007.
- 6 気象庁情報基盤部数値予報課, [令和7年度数値予報解説資料集], pp.22, 28, 39, 2026.
- 7 川村誠治, 花土弘, 太田弘毅, “地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定手法の研究開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.1, pp.15-19, 2019.
- 8 S. Kawamura, H. Ohta, H. Hanado, M. K. Yamamoto, N. Shiga, K. Kido, S. Yasuda, T. Goto, R. Ichikawa, J. Amagai, K. Imamura, M. Fujieda, H. Iwai, S. Sugitani, and T. Iguchi, “Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves,” Radio Sci., 52, 2017. doi:10.1002/2016RS006191.
- 9 Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware, “GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water,” J. Appl. Meteor., vol.33, pp.379-386, 1994.
- 10 科学技術振興機構, “戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第1期 レジリエントな防災・減災機能の強化 課題② 豪雨・竜巻予測,” (参照 2026-07-13). https://www.jst.go.jp/sip/k08_team2.html
- 11 情報通信研究機構, “地デジ放送波を使った水蒸気量推定手法の試験観測を板橋区でスタート―都心の多数のビルを反射体として、ピコ秒の精度で計測―,” NICTプレスリリース, 2018年1月31日, (参照 2026-07-13). <https://www.nict.go.jp/press/2018/01/31-1.html>
- 12 山口 弘誠, 村瀬 公崇, 花土 弘, 金丸 佳矢, 川村 誠治, 相馬 一義, 中北 英一, “地デジ放送波とGNSSを用いた積乱雲における対流圏中層水蒸気が降水増幅に与える影響,” 京都大学防災研究所年報, 第64号B, pp.187-207, 2021. <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/items/c529fcb9-c5ec-4912-aa90-3b356e1a8f96>
- 13 相馬 一義, “地デジ放送波による水蒸気量変動推定の高密度直接観測による検証と豪雨予測への活用方策の検討,” 前田記念工学振興財団研究報告, 2025. <https://www.maedakksz.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2025/07/award-rg-1-14.pdf>
- 14 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局, “戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期 国家レジリエンス (防災・減災) の強化 研究開発計画,” 2022. [Online], (参照 2026-07-13). <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/220209/siryo2.pdf>
- 15 中川勝広, 花土弘, 川村誠治, 岩井宏徳, Baron Philippe, 佐藤晋介, “戦略

的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期『国家レジリエンス (防災・減災) の強化』V. 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,” 情報通信研究機構研究報告, vol.65, no.1, pp.21-26, 2019.

doi:10.24812/nictkenkyuhoukoku.65.1_21.

- 16 S. Shimizu, H. Hanado, T. Watanabe, N. Kitai, S. Kawamura, and T. Maesaka, “Drone-Based Evaluation of Low-Level Water Vapor Observations Using Digital Terrestrial Broadcasting Waves,” Proc. Photonics & Electromagnetics Research Symposium Fall 2025 (PIERS-Fall 2025), Chiba, Japan, pp.1-8, Nov. 2025.

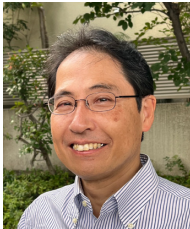
doi: 10.23919/PIERS-FALL62445.2025.11394290.

- 17 OpenStreetMap contributors, “OpenStreetMap,” (accessed July 10, 2026).

<https://www.openstreetmap.org>

- 18 小田 僚子, 石塚 瞬, 今 颯人, 花土 弘, 川村 誠治, “地上デジタル放送波の伝搬遅延時間を利用した水蒸気量変動と局地気象場との関係,” 土木学会論文集, vol.82, no.16, 25-16120, 2026,

doi: 10.2208/jscej.25-16120.



花土 弘 (はなど ひろし)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
マイクロ波リモートセンシング



河谷 能幸 (かわたに よしゆき)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
テニユアトラック研究員
水文学

【受賞歴】

2025年 水文・水資源学会研究発表会
ポスター賞

2022年 土木学会関西支部年次学術講演会
優秀発表賞



川村 誠治 (かわむら せいじ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
室長
博士 (情報学)
レーダーリモートセンシング

【受賞歴】

2018年 映像情報メディア学会 優秀発表賞

2018年 日本気象学会 気象集誌論文賞