



NICTにおける電磁波技術研究の最新トピックス(その1)



国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 研究所長 **たいら かずまさ**
平 和昌

1. はじめに

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）では、2016年度から始まった第4期中長期計画においてICT分野の基礎的・基盤的な研究開発等の実施を掲げ、その一分野として「センシング基盤分野」の研究開発を実施している。当該分野では、電磁波を利用して人類を取り巻く様々な対象から様々な情報を取得・収集・可視化するための技術、社会経済活動の基盤となる高品質な時刻・周波数を発生・供給・利活用するための基盤技術、様々な機器・システムの電磁両立性（EMC）を確保するための基盤技術として、リモートセンシング技術、宇宙環境計測技術、電磁波計測基盤技術（時空標準技術、電磁環境技術）の研究開発を実施することとした。

2018年2月、日本ITU協会ITU-R研究会の橋本明主査からNICTにおける電磁波技術研究の最新トピックスを紹介する機会をいただき、第364回研究会において講演を行ったところ、ITUジャーナルでも同講演の内容を紹介させていただくことになった。今号と次号の2回にわたり紹介していきたい。

2. ゲリラ豪雨の到来を予測するために

近年、急激な都市化の拡大が原因とみられる異常気象が日本各地で起きている。その代表的なものが局地的大雨（いわゆる「ゲリラ豪雨」）であり、突発的な大気現象であるがゆえに、しばしば甚大な被害を引き起こして社会問題となっている。これらの現象は積乱雲の発達に伴って発生することが知られている。したがって、積乱雲の発達を早期に検知して

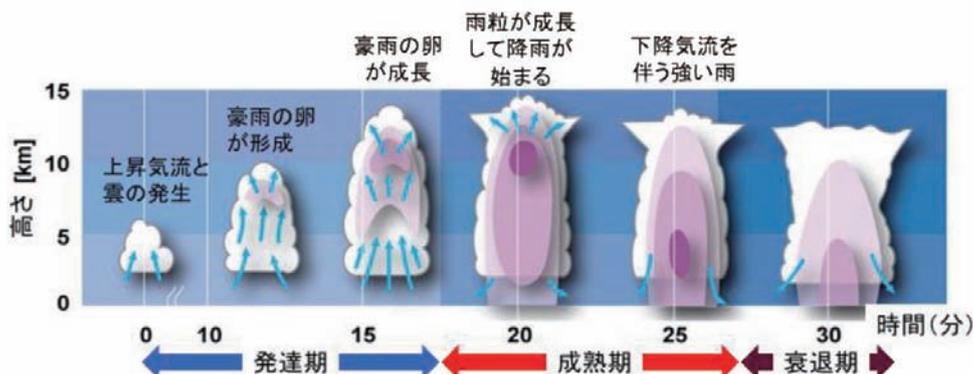
避難指示等へのリードタイムを稼ぐことが、被害を最小限にする目的のために極めて重要である。

図1に積乱雲の一生の典型例を示す。その過程では、まず、上昇気流に乗って地上の水蒸気が集まり、雲を形成する。その後、積乱雲の中で雲粒が成長して雨粒となり地上に降ってくるが、地上に雨が降る10分ほど前には積乱雲の中に成長した雨粒（豪雨の卵）が現れている。この過程から、①地上の水蒸気量の変化を見逃さないこと、②豪雨の卵を可能な限り早く見つけること、の2つが可能となれば、ゲリラ豪雨を早期に検知することができる。NICTは、①を可能とする「地上デジタル放送波を用いた水蒸気量の推定技術」、②を可能とする「フェーズドアレー気象レーダ」を開発した。

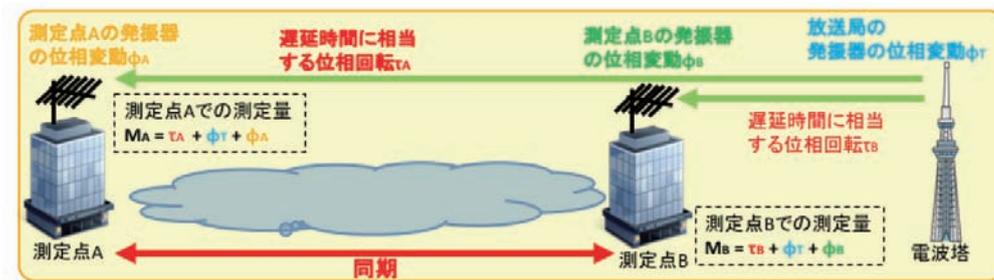
3. 地上デジタル放送波を用いた水蒸気量の推定

空間の水蒸気量の変化により、その空間を伝わる電波の速度が変化する。その変化量は、例えば5kmのスパン全体で水蒸気量が1%増加すると、電波の到達時間は約17ps（ピコ秒）遅れる。この遅延量を長時間にわたり測定できれば、積乱雲の元となる水蒸気量の変化の過程が観測できる。

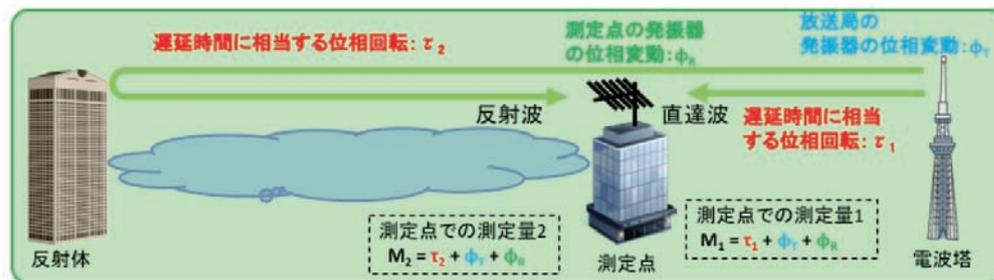
我々は、地上デジタル放送（地デジ）の電波を受信することで水蒸気量を推定する方法を考案した^[1]。ここで、用いる地デジ受信装置が有する発振器の位相雑音は通常1,000ps～2,000psであるため、1ps～2psの測定精度を要求する水蒸気量推定では何らかの工夫が必要である。図2に、地デジ放送波を用いた水蒸気量推定の原理を示す。図2(a)



■図1. 積乱雲の一生（典型的な例）



(a) 任意地点間で同期をとる方法（同期法）



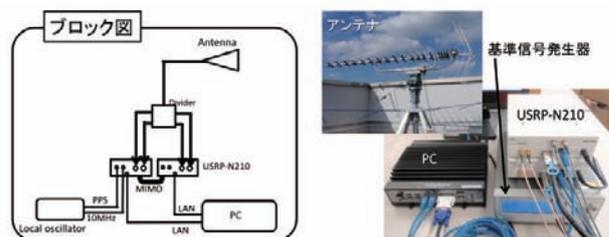
(b) 反射波を使う方法（反射法）

■図2. 地デジ放送波を用いた水蒸気量推定の原理

では、任意地点間の水蒸気量を測定するために測定点Aと測定点Bそれぞれで有する受信装置の発振器を同期させる必要があるが、ピコ秒の精度で同期させることは容易ではない。一方、図2 (b) では、遠方のビルなどの反射体からの反射波と電波塔からの直達波の双方を受信することにより測定点が1つとなり、上述の同期は不要となることから、システムの構成が簡便になる。その反面、適切な反射体を選択する必要があることから、任意地点間の水蒸気量を測定することには制限が生じる。このたび我々は、図2 (b) の方法（反射法）を用いて水蒸気量を推定した。

地デジ放送波を用いる利点として、電波の伝搬路の遅延量（伝搬遅延）を比較的容易に求めることができることがあげられる。地デジ放送波にはデータ列が既知の信号（SP信号）が埋め込まれており、この信号を利用することにより伝搬路の伝達関数（遅延プロファイル）を求めることができ、その位相から伝搬遅延を精密に計測できる。さらに、遅延プロファイルのピーク位置の変動を求めることにより、伝搬遅延の変動を観測することができる。用いた測定システムを図3に示す。ここでは、ソフトウェア無線装置（USRP-N210）を用いて、地デジ放送波の搬送波の位相をリアルタイムで測定するシステムを開発した。

図4に、測定対象としたエリアと、測定結果より求めた水蒸気量を示す。測定は、小金井市にあるNICTから立川市にあ

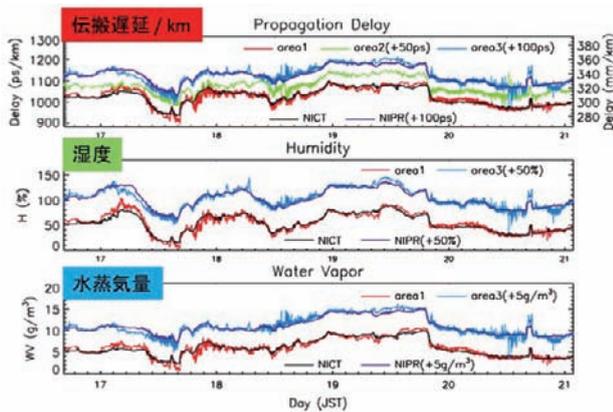


■図3. 地上デジタル放送波を用いた伝搬遅延測定システム

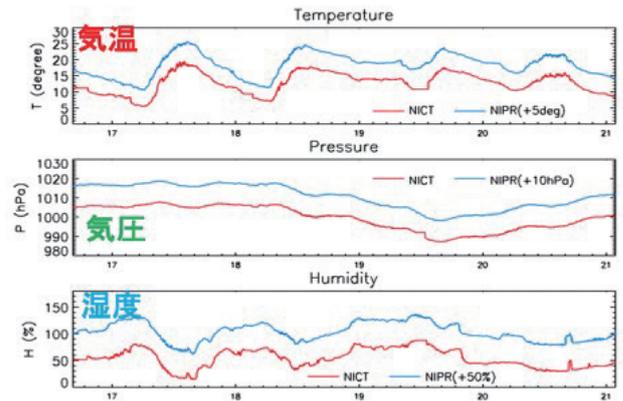
る大学共同利用機関法人情報システム研究機構国立極地研究所（NIPR）にかけてのエリアで実施し、途中にある3つの建築物を反射体として利用した（図4 (a)）。図4 (b) に、2016年3月16日から21日にかけての各エリアにおける単位km当たりの伝搬遅延の変化を示す。例えば、エリア2の伝搬遅延は、反射体2からの反射波と反射体1からの反射波をNICTで同時に受信し、各受信信号から導出した遅延時間の差として求めている。同図には、NICT、NIPRそれぞれの地点における伝搬遅延の値も細い実線で示している。これらの値は、図4 (c) に示すNICT、NIPRそれぞれの地点における地上気象観測データ（気温、気圧、湿度）から算出した値である。両者は良い一致をみせている。測定で求めた伝搬遅延量から推定したエリア1及びエリア3の水蒸気量の変化を図4 (b) に示す。同図には、NICT、NIPRそれぞれの地点における水蒸気量（図4 (c) から算出した値）も細い実



(a) 測定対象としたエリア

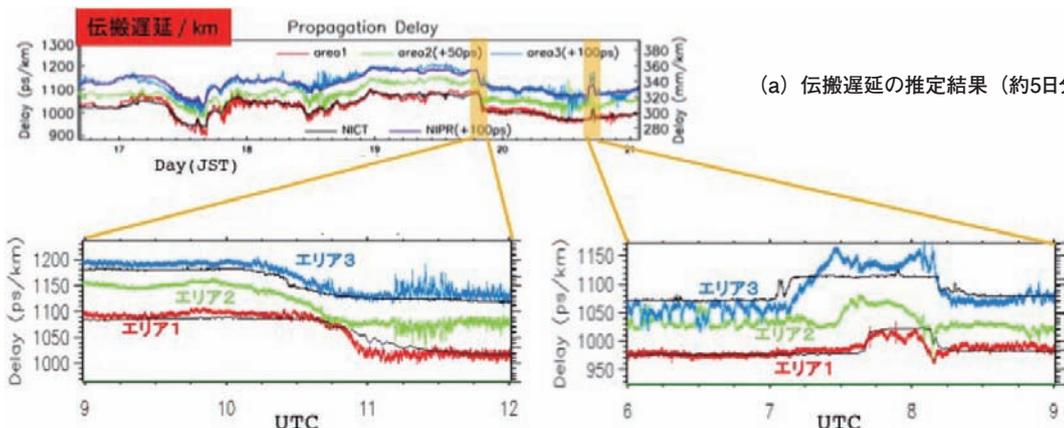


(b) 推定結果 (伝搬遅延、湿度、水蒸気量)



(c) NICT及びNIPRにおける地上気象観測結果

■ 図4. 地上デジタル放送波を用いた水蒸気量等の推定結果



(a) 伝搬遅延の推定結果 (約5日分全体)

(b) 伝搬遅延の推定結果 (各3時間分を拡大)

■ 図5. 地上デジタル放送波を用いた伝搬遅延の測定結果

線で示している。両者はよく一致していることから、本技術の妥当性が示された。図4 (b) に示した伝搬遅延の変化のうち、一部分を拡大した様子を図5に示す。図5 (a) の黄色でハッチした2つの時間帯 (3時間分) について、それぞれを拡大したのが図5 (b) である。この図より、エリア3で起こった伝搬遅延の変動が、時間経過した後、エリア2、エリア1でも起こっていることが分かる。したがって、この2つの時間帯では、ともに気象現象が西から東へ移動したと考えることができる。

地デジを利用した水蒸気量推定のシステムは、受信機能だけで構成されるシステムであり、気象レーダのように電波を送信して測定するシステムとは異なり、無線設備の免許が不要である。また、図3に示すような比較的安価な装置によりシステムを構築できる。これらの利点から、観測点を容易に設置することが可能であり、これまで不可能であった水蒸気量の広範囲かつ面的な観測を可能とするものである。現在、多くの外部機関の協力を得て、関東域に観測点を増やす活動を展開している。

4. フェーズドアレイ気象レーダ

上空の雨や雪の強度分布を地上から把握するために、マイクロ波帯の電波を使った気象レーダが全国に設置されている。気象レーダでは、発射された電波が雨や雪に反射して戻ってくる時間を測定することによりレーダから雨や雪までの距離が分かり、反射してきた電波の強度から雨や雪の量を求めることができる。さらに、反射してきた電波の周波数シフトを観測することにより、どちらの方向に雨や雪の領域が動いているか（ドップラ速度）を把握することができる。気象庁では、C帯を利用した気象レーダを全国20か所で運用している。一方、国土交通省では、河川の防災を目的として「XRAIN」の名称でX帯及びC帯を利用した気象レーダを運用している。これらのレーダにはパラボラアンテナが用いられていることから、地上から上空までの全方位を立体的にスキャンするには時間を要し、いずれのシステムでも約5分間隔で観測データを得るのが現状である。そのため、2章で述べたように、ゲリラ豪雨につながる積乱雲の発達を細かく観測することが困難な状況である。このような背景から、高速に観測データを得ることのできる新たな気象レーダの開発が強く求められていた。これを実現するのが「フェーズドアレイ気象レーダ（PAWR）」である。

NICTは、大阪大学及び（株）東芝と共同でPAWRの開発に向けた委託研究を2008年から開始し、2012年、大阪大学吹田キャンパスに日本で初めてのPAWRを設置し、運用を開始した。さらに2014年には、NICTの未来ICT研究所（神戸市）と沖縄電磁波技術センター（恩納村）それぞれにPAWRを設置し、運用を開始した^[2]。図6にPAWRの外観と構造を示す。観測にはX帯を用い、128素子導波管スロットアンテナで受信した信号をデジタルビームフォーミングすること

により、半径約60km、高度約14kmの範囲にある雨雲の3次元構造を30秒ごとに観測できる。

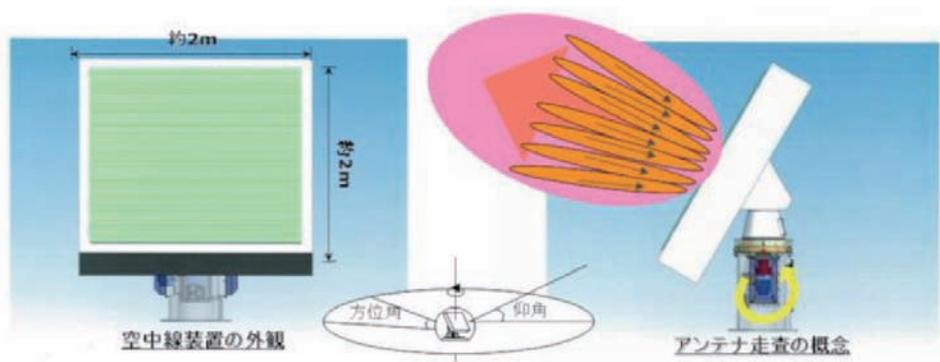
図7に、大阪大学吹田キャンパスのPAWRが捉えた「豪雨の卵」の形成から成長、降雨までの過程を示す。この図は、2012年7月26日、京都府精華町付近に発生した積乱雲が成長し局地的豪雨に至る過程を、北東方向から3次元的に2分ごとに見た様子を示している。17時30分頃、高度4～6kmに1つ目の豪雨の卵が観測され、それが成長して4分後には降下（降雨）している。同様に17時34分頃に2つ目の豪雨の卵が観測され成長する様子が明確に捉えられている。パラボラアンテナによる測定では、このような過程を詳細に観測することは困難である。

上述の3つのPAWRで観測したデータは、取得後、順次降雨強度に変換され、観測の約30秒後にはNICTのサーバで公開されている。これらのデータは誰でも自由に使用することができる。そのため、神戸市と連携し「ゲリラ豪雨対策支援システム」を構築して実証実験を実施したり、民間の気象予報会社と連携して、スマートフォンアプリを用いたプッシュ型の大雨予測通知を配信する実験を実施するなど、データの様々な利活用が動きつつある。

降雨レーダにおいて雨量をより高精度に推定できる手法として「偏波」を用いる方法がある。垂直偏波、水平偏波それぞれの電波を送信・受信し、偏波成分の比や伝搬位相差を測定することにより、高精度な雨量推定や雨滴粒径分布の推定が実現できる。NICTでは、この手法を用いたPAWRである「マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ（MP-PAWR）」を2017年度に開発し、埼玉大学（埼玉県さいたま市）に設置し、2018年度より観測を始めている^[3]。

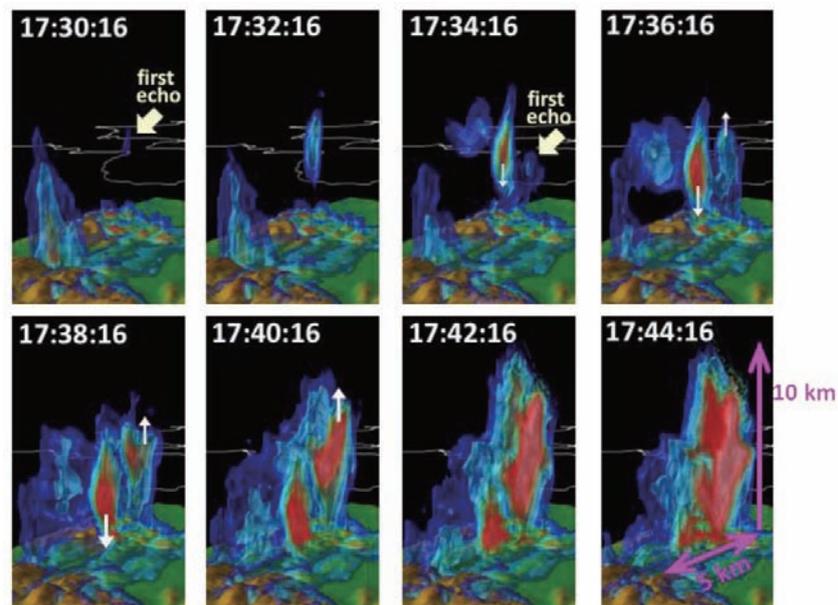


(a) 全体の外観



(b) アンテナの外観と走査イメージ

■図6. NICTが設置・運用しているフェーズドアレイ気象レーダ



■図7. フェーズドアレイ気象レーダで捉えた豪雨までの過程

5. 豪雨・竜巻被害の最小化に向けて

地デジ放送波を用いた水蒸気量推定システム及びMP-PAWRは、内閣府が推進する「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」において進められている「レジリエントな防災・減災機能の強化～豪雨・竜巻予測技術の研究開発」において実施している研究開発プログラムである。このプログラムではNICTが中心となり、東芝インフラシステムズ（株）、日本気象協会、首都大学東京、埼玉大学、名古屋大学、山口大学、防災科学技術研究所、鉄道総合技術研究所、国土交通省国土技術政策総合研究所が連携して実施し、積乱雲の発達過程を生成の初期段階から高速・高精度で観測・推定するシステムの開発や、災害対応の意思決定を支援するシステムの開発を行い、国土交通省や気象庁が発表する防災や気象の情報の高度化や、局地的大雨による都市やライフライン施設、鉄道網における災害、山間地域や都市郊外での土砂災害被害想定地域における警戒体制の充実と住民の避難行動、及び適切な交通規制と利用者の最適な避難に貢献することを目標としている。さらに、東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会の運用において、本プログラ

ムで開発したシステムの活用を目指している。降雨構造を素早く立体的に観測し、そのデータと数値モデルを組み合わせ、高精度な豪雨予測を実現し、社会ニーズに合わせたきめ細やかな豪雨予測の提供を早期に実現させるために、NICTは今後一層尽力していきたい。

（次号につづく）

（2018年2月15日 ITU-R研究会より）

参考文献

- [1] S. Kawamura et al., "Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves," *Radio Science*, 52, 367-377, 2017.
- [2] F. Mizutani et al., "Fast-scanning phased-array weather radar with angular imaging technique," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56, 2664-2673, 2018.
- [3] 情報通信研究機構報道発表「世界初の実用型「マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ（MP-PAWR（エムピーパー）」を用いた実証実験の開始について”，<http://www.nict.go.jp/press/2018/07/19-1.html>