

# リモートセンシング研究室 Remote Sensing Laboratory

## リモートセンシングとは

リモートセンシングとは、様々な情報を遠隔から取得する技術のことです。高層大気のように直接赴く事が困難な場所、火口内部のような危険な場所の情報取得に威力を発揮します。私達の研究室では電磁波を利用したリモートセンシングの研究・開発を行っています。

## 測定原理

遠隔からの測定を実現するため、電磁波や音波といった波の伝搬を利用します。具体的には波の往復時間や反射/減衰の様子から信号処理を経て測定対象までの距離及び対象の性質を知ることができます。

波として電波を利用する装置は

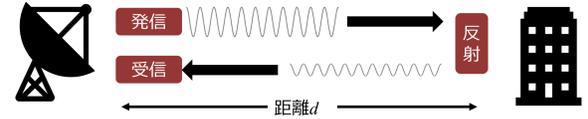
**レーダー(Radar: Radio detection and ranging)**

電波では無く光を利用するものは

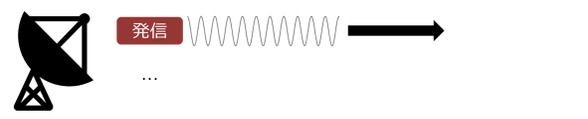
**ライダー(Lidar: Light detection and ranging)**

と呼ばれています。さらに装置は、送受信の両方を行うもの(アクティブ)、受信のみを行うもの(パッシブ)に分類されます。

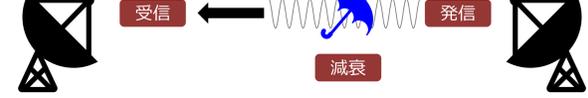
▶ 往復時間を測れば対象物までの距離 $d$ (片道)を計算できます。  
距離 $d = \text{光速}c \times (\text{往復時間} \div 2)$



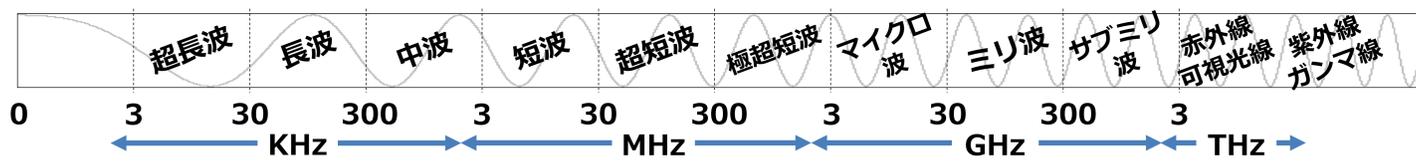
▶ 返ってこなければ反射を起こすような対象物がないことが分かります。



▶ 発信と受信が別の測定装置もあります。



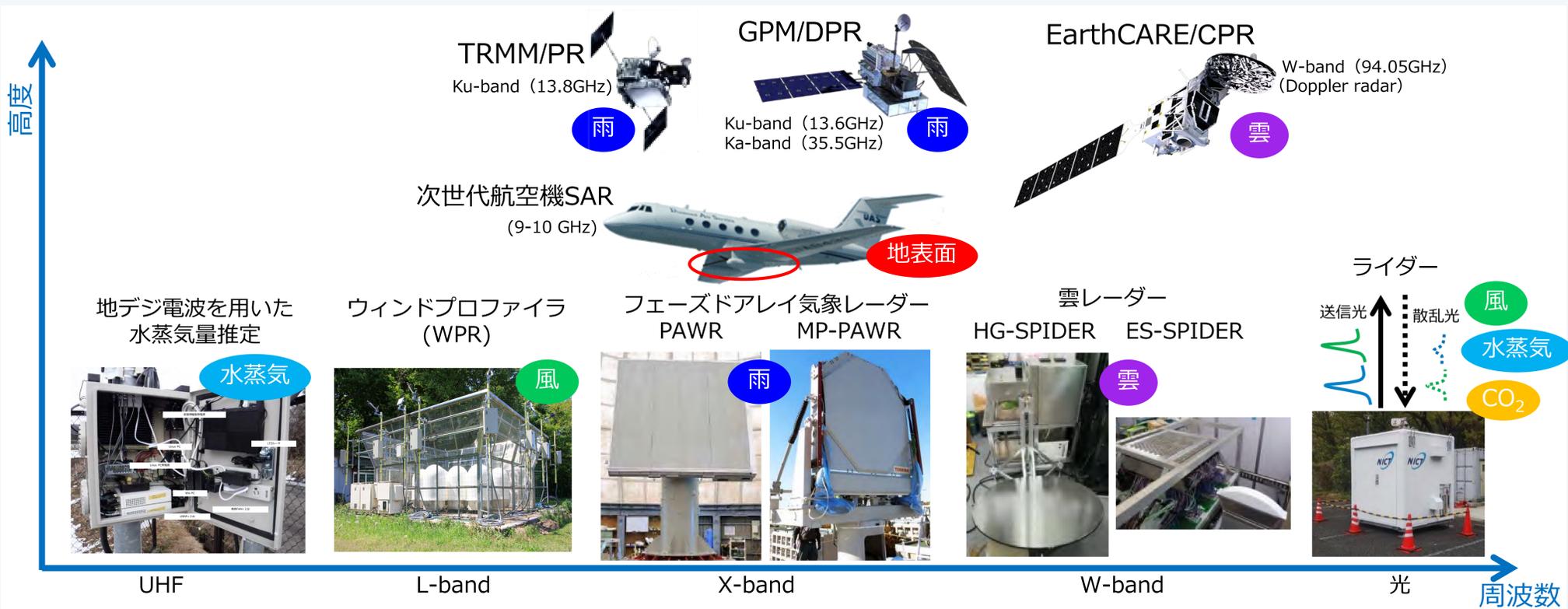
測定原理



周波数に応じた電磁波の名称

## 研究対象

私達の研究室が研究開発を進めている観測装置を以下に示します。幅広い周波数帯の電磁波を使い、地上から・航空機から・衛星から様々な対象を観測する装置です。**装置開発・信号処理・応用研究**を組み合わせ、突発的気象現象の早期捕捉や予測精度向上・自然災害発生時の状況把握・グローバルな気候変動モニター等のテーマに取り組んでいます。



**装置開発**・・・いかに安定的に、精度良く、あるいは高速に計測できるか  
**信号処理**・・・どのように計測データを処理し、得たい物理量に変換するか  
**応用研究**・・・得られた物理量をどのように社会に役立てることができるか

# フェーズドアレイ気象レーダーの研究開発 Development of Phased Array Weather Radar

## フェーズドアレイ気象レーダーとは

ゲリラ豪雨や竜巻・突風などの突発的・局地的な気象災害の早期検知や予測を目指して開発された新型レーダーで、128本のアンテナによる仰角方向の電子スキャンにより、半径60 km、高度16 kmの範囲の詳細な3次元降水分布を30秒で観測できます。

## 社会的背景

近年、局地的大雨（ゲリラ豪雨）による鉄砲水や都市水害、竜巻・突風による建造物の倒壊などの局所的気象災害が社会問題となっています。大雨や竜巻の状況把握や予測に対しては気象レーダーによる積乱雲の3次元観測が重要ですが、従来のレーダーでは3次元観測に5分以上の時間が必要であり、十分な時間空間分解能のデータを得ることができませんでした。

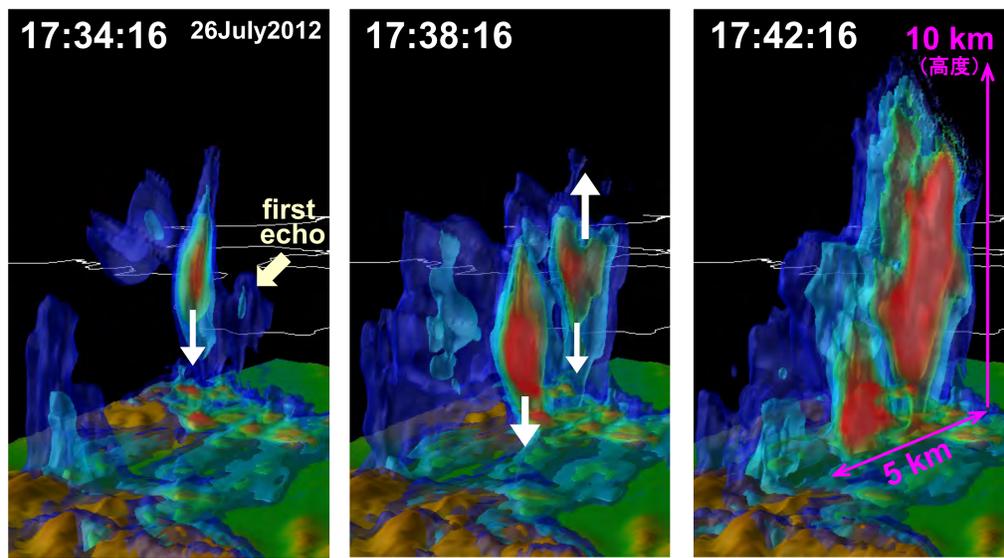


都賀川の鉄砲水 (2008/7/28)



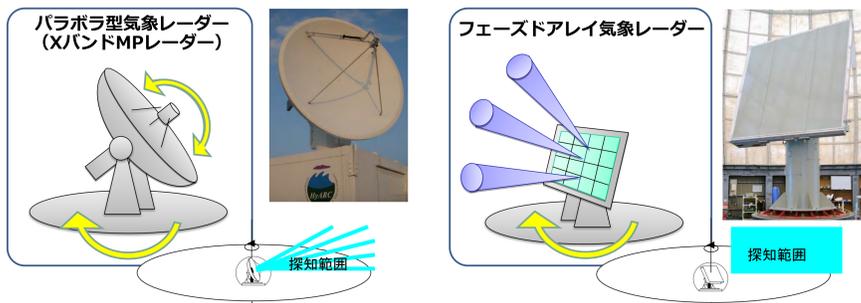
つくば市竜巻 (2012/5/6)

## ゲリラ豪雨の3次元構造

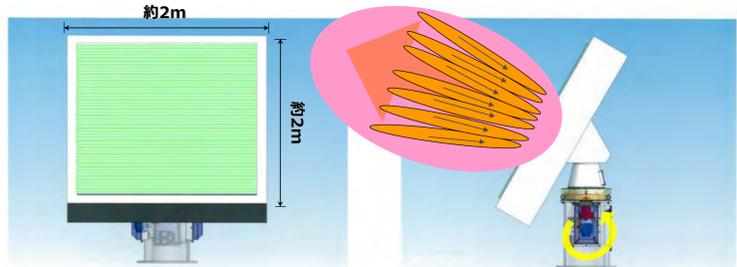


フェーズドアレイ気象レーダーで観測された発達する積乱雲内の3次元降水分布。赤い部分は強い降水(大雨や霰など)を示します。高度5 km付近に現れたファーストエコーは急激に成長し上空10 kmに達する大量の降水を生成し、この後30分以上にわたって地上に大雨を降らせました。

## 従来型気象レーダーとの違い



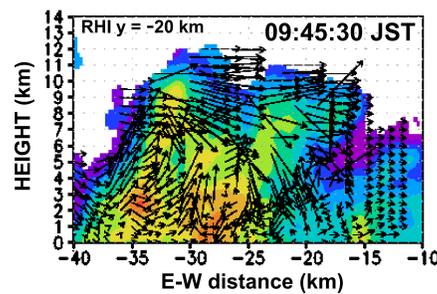
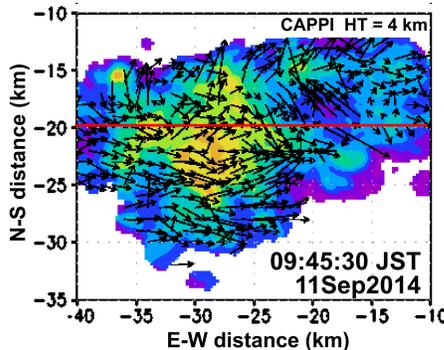
パラボラ型気象レーダー	フェーズドアレイ気象レーダー
仰角：機械走査	仰角：電子走査
方位角：機械走査	方位角：機械走査
3次元スキャン (約15仰角) / 5分程度 (地上は1分周期で観測)	3次元スキャン (約100仰角) / 10秒~30秒



フェーズドアレイ気象レーダーのアンテナ外観 (左) と電子走査の概念 (右)

従来のパラボラ型気象レーダーは方位角方向1回転毎に仰角を変更することで3次元走査を行うため、15仰角の観測に5分程度 (15回転分) を要していました。フェーズドアレイ気象レーダーは、仰角方向に幅の広いファンビームを送信し、受信時に128本のスロットアンテナの信号から複数の細いビームを同時形成 (Digital Beam Forming) することで仰角方向を走査します。約100仰角のデータを0.1秒以内に取得できるため、30秒 (1回転分) で距離60 km、高度16 kmの3次元観測が可能となります。

## 2台のドップラーレーダー観測



フェーズドアレイ気象レーダーは、一般的な気象レーダーと同じくドップラー観測機能を有しますが、ドップラー速度はレーダーの視線方向成分 (レーダーに近づく/遠ざかる方向) の風速しか観測できません。2台のレーダーで同時に観測されたドップラー速度データを合成することで、図のような風速の3次元ベクトルを30秒毎に算出することができます。

# フェーズドアレイ気象レーダーのデータ利活用 Data Application of Phased Array Weather Radar

## 30秒毎の高密度 3次元データ

フェーズドアレイ気象レーダー（PAWR）は、100 m距離分解能、100仰角（ $\sim 1.0^\circ$ 分解能）、300方位角（ $1.2^\circ$ 分解能）という高密度の3次元データを半径60 km、高度16 kmの範囲で30秒毎に観測することができます。この観測ビッグデータを用いた取り組みを紹介します。



沖縄 PAWR

神戸 PAWR

吹田 PAWR

## Webデータ公開

フェーズドアレイ気象レーダー (吹田) リアルタイム観測データ (吹田) 大阪大学

2013/07/13 16:10:10 **Google マップス表示**

リアルタイム表示 最新の降雨分布

2014/09/11 09:45:02

過去データの利用

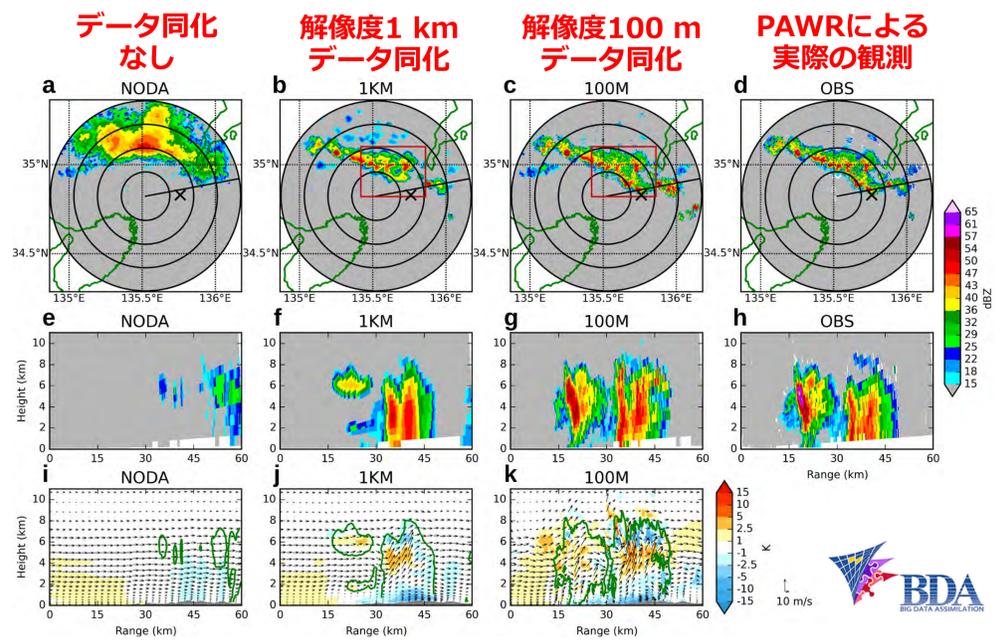
トップページでは吹田・神戸・沖縄PAWRのリアルタイム Q L 画像を公開

<https://pawr.nict.go.jp>

高速なJGN回線を用いて、吹田・神戸・沖縄PAWRの観測データをNICT小金井本部に転送し、クイックルック(QL)画像をリアルタイムでWeb公開するとともに利用ユーザーにデータを配信しています。2PBを超える過去データも全てアーカイブしており、WebページからQL画像や降雨サマリーを検索することができます。



## ビッグデータ同化によるゲリラ豪雨予測



「京」コンピュータを用いてPAWR観測データを同化することで「100 m分解能で30秒毎に更新されるリードタイム30分の数値予報の実証」を目指したCREST研究課題（研究代表者：三好建正@理研）を推進しています。LETKFというデータ同化手法を用いることで実際の観測データと見間違ふような降水データがスーパーコンピュータで再現されていますが（上図）、リアルタイム数値予報を行うにはまだ多くの課題が残されています。

## 3次元ナウキャスト

理研天気予報研究 関西地方の降水予測

フェーズドアレイ気象レーダーと3D降水ナウキャストによる30秒間隔の10分先までの降水予報の実証実験

2017/05/10 16:50:13 Observation vs 5.0min Forecast

<https://weather.riken.jp>

30秒毎のPAWR観測データを用いて、降水エコーの3次元移動ベクトルを用いた補外予測手法による3D降水ナウキャストのリアルタイム実証実験を「理研」と協力して行っています。



## スマホアプリ「3D雨雲ウォッチ」

3D雨雲ウォッチ ~フェーズドアレイレーダー~

過去の雨雲

3D雨雲レーダー画面 (2016年版)

EMTアイ

2017年版

<http://pawr.life-ranger.jp>

(株)エムティーアイとNICTの共同研究で2015年に開発した無料のスマホアプリ「3D雨雲ウォッチ」では、PAWRの3次元画像をリアルタイムで配信してPUSH通知による豪雨速報の実証実験を実施しています。



Miyoshi, et al., 2016: "Big Data Assimilation" revolutionizing severe weather prediction, Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 1347-1354.  
Otsuka, et al., 2016: Precipitation nowcasting with three-dimensional space-time extrapolation of dense and frequent phased array weather radar observations, Wea. Forecasting, 31, 329-340.

# 地上デジタル放送波を利用した水蒸気量推定

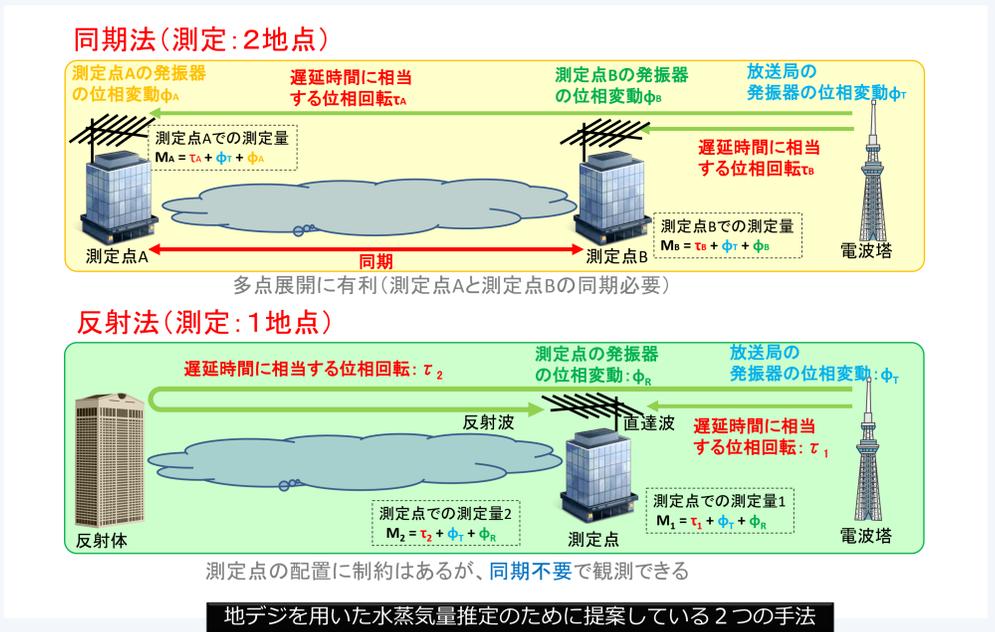
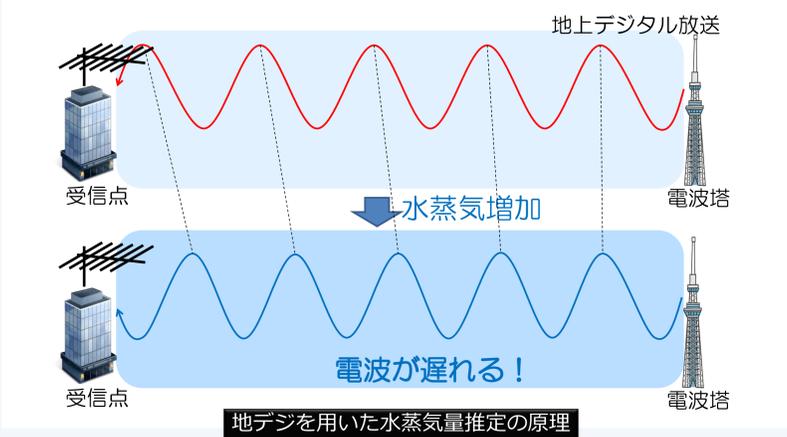
## Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves

### 概要

ゲリラ豪雨など局所的で激しい気象現象の防災・減災を目的に、地上デジタル放送波を用いた水蒸気量推定の手法を開発しています。雨のもとである水蒸気（気象レーダーで見える前の水）を知ることで、気象予測の精度向上が期待されます。地上デジタル放送波の伝搬遅延量をピコ秒（1兆分の1秒）という高精度で測定する観測装置を開発し、水蒸気量を広範囲で効率的に観測することを目指しています。

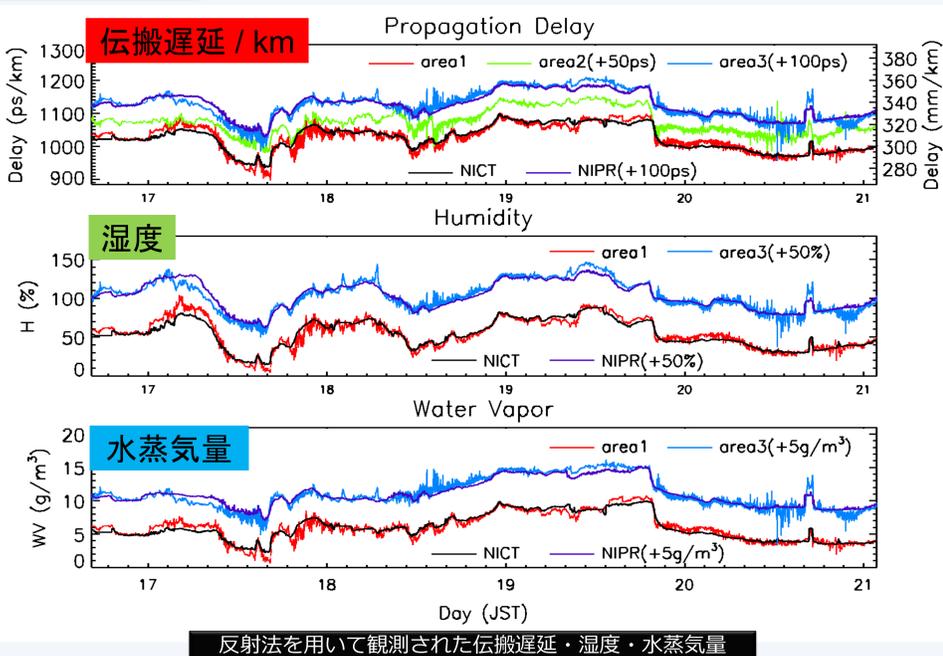
### 水蒸気推定の原理と手法

大気中の水蒸気量変動すると、電波の伝搬速度がわずかに変動します。伝搬速度の遅れ（伝搬遅延）はとても小さいですが、ピコ秒（1兆分の1秒）の精度で計測することができれば、水蒸気量の変動がわかります。



伝搬遅延は地デジ放送波の位相を使って測定します。送信局や測定に使う発振器のランダムな位相変動が計測を困難にするため、このランダムな位相変動を消去するために、同期法や反射法という手法を提案しています。

### 観測例



NICTで反射法を用いて測定した観測例。赤、緑、青の各線はそれぞれ下の図のエリア1～3の測定結果を表しています。赤・青と重なる黒・紫の線はそれぞれNICTと国立極地研究所（NIPR・立川市）の地上気象測器で観測された気圧・気温・湿度から算出した値です。地デジの観測結果はこれらと良い一致を示しており、妥当な測定ができていることがわかります。



NICTでは3つの反射波を受信することができ、それらを用いて3つのエリアに分割した伝搬遅延の測定ができます。

Kawamura, et al., Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves, *Radio Sci.*, 52, 367-377, doi: 10.1002/2016RS006191, 2017.

### 測定装置



主な信号処理をPCの中で行うソフトウェア無線の技術で観測装置のプロトタイプを開発しました。さらに、低消費電力・安定動作する新しい観測装置も開発し、観測展開を進めています。

### 観測展開

現在首都圏にプロトタイプ観測装置を18地点展開しています。また、線状降水帯予測を目指して九州に新しい観測装置を5地点展開し、さらに数を増やしていく計画です（2021年7月現在）。得られたデータを数値予報モデルにデータ同化して、予測精度の向上を確認する実証実験を行っています。

# ウィンドプロファイラ観測技術の高度化

## Validation of measurement techniques for wind profiler radar

### ウィンドプロファイラ (WPR) とは

ウィンドプロファイラ (WPR) は、晴天域における風速の高度分布を測定するレーダーです。大気中の乱流は、気温と水蒸気を変動させることで、大気の電波屈折率を変化させます。WPRは、電波をアンテナから送信することで、電波屈折率の変化により発生する電波の散乱エコー (大気エコー) を受信します。大気エコーの移動速度 (ドップラーシフト) から、鉛直方向及び水平方向の風速を測定することができます。

気象庁は、局地的気象監視システム (WINDAS) と呼ばれる、WPRの観測網を運用しています。WPRによる風速観測データは、きめ細かな天気予報のもととなる数値予報などに利用されています。

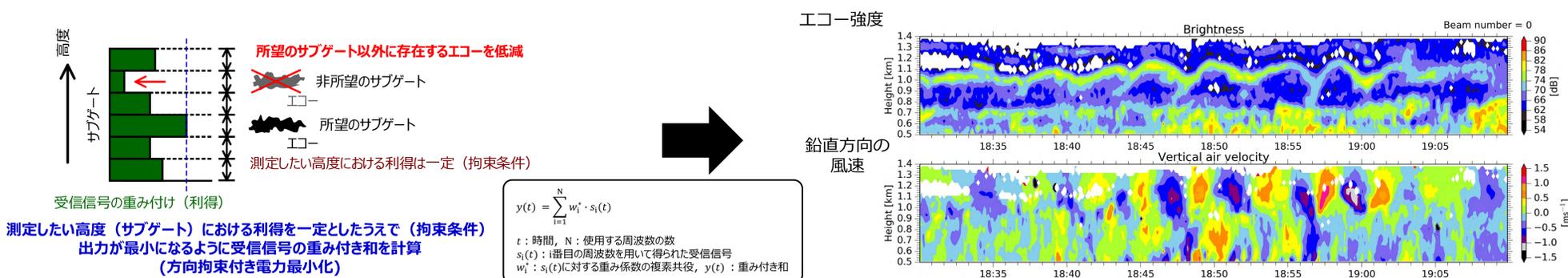
### WPRにおける観測技術の高度化

気象状態の詳細な把握と高精度の予測を行うためには、気象状態を優れた分解能と精度で観測する必要があります。WPRが持つ高度分解能をさらに向上させることで、気象状態を知る手がかりとなる風の細かな変動や乱気流を詳細に観測できます。WPRの受信信号には、地表や空中に存在する物体による非所望エコー (クラッタ) が混入します。クラッタの混入を低減することで、風速等の測定データの品質を向上させることができます。

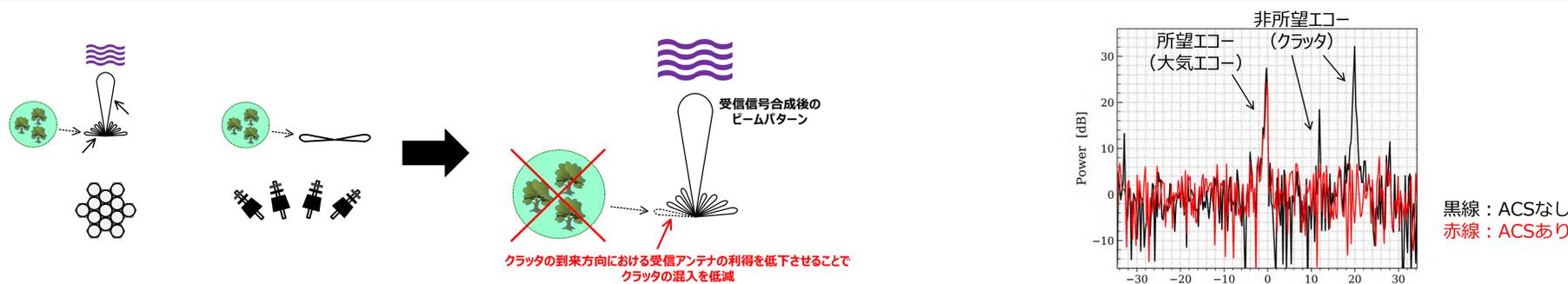
WPRの観測分解能と測定データ品質の向上を目指した、WPRにおける観測技術の高度化に取り組んでいます。WPRにおける有望な技術の例として、高度分解能を向上するレンジイメージング (RIM) とクラッタを低減するアダプティブクラッタ抑圧 (ACS) があります。



図1: NICTが有する1.3GHz帯WPR (LQ-13)



RIMでは、送信毎に周波数を切り替えることで、周波数毎に受信信号を取得します。周波数毎に得られた複数の受信信号に対して、測定したい高度 (サブゲート) における利得を一定としたうえで出力が最小となるように受信信号の重み付き和を計算する (方向拘束付き電力最小化) ことで、高度分解能が向上します。方向拘束付き電力最小化のような、入力信号の状態に応じた最適な出力を得るための信号処理手法を、適応信号処理と呼びます。右図に示す観測例では、RIMを用いることで、大気不安定に伴う鉛直方向の風速変動 (乱気流の発生) を解像できています。



ACSでは、方向拘束付き電力最小化に基づく適応信号処理を用いることで、複数のアンテナ (サブアレイ) から得た受信信号の重み付き和を計算します。ACSにおける適応信号処理は、クラッタの到来方向における受信アンテナのサイドローブが低下するよう、受信アンテナのビームパターンを動的に制御することに相当します。図に示す観測例では、ACSにより、ドップラ速度12m/sと20m/s付近に存在するクラッタを低減できています。

### 今後の展開

WPR観測技術の検証と評価を行い、WPRの観測分解能と風速等の測定データ品質を向上させることで、気象状況の把握・予測に役立つWPRの高度化を実現します。

謝辞: 本件の一部は、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た。

参考文献: 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/windpro/kaisetsu.html>