

短時間3次元観測を可能にする フェーズドアレイ気象レーダーの開発

Development of 3D Rapid Scanning Phased Array Weather Radar

柏柳太郎 佐藤治 諸富和臣 菅原博樹
Taro Kashiwayanagi Osamu Sato Kazuomi Morotomi Hiroki Sugawara

要 旨

近年、災害を引き起こすような局所的豪雨や、竜巻、雹（ひょう）といった激しい気象現象が都市部で発生しており、気象レーダーではその原因となる積乱雲を3次的に観測することで豪雨の発生、発達を予測するさまざまな研究が行われている。しかしながら、積乱雲は5分から10分間程度と短い時間で発達することがあり、また高度は15kmにも達することから、3次的な観測に5分から10分かかかる従来のパラボラ式の気象レーダーでは時間的分解能がまだまだ不十分である。当社は、高度15km、半径80kmの3次元空間を30秒間で観測する1次元DBF技術を用いたフェーズドアレイアンテナを採用した気象レーダーの試作機を開発した。試作機を千葉市に設置して試験観測を行った結果、激しい気象現象を引き起こす積乱雲の発達の様子を、従来と比べ早い段階で捉えることに成功した。

Abstract

In recent years, urban areas in Japan suffer from more and more disasters by severe weather such as heavy rain fall or tornadoes. For analyzing and predicting the severe weather, weather radars are expected to observe rapidly developing cumulonimbus by scanning whole three-dimensional space with high spatial resolution; however, conventional weather radars with a parabolic antenna need five to ten minutes for three-dimensional scanning. JRC have developed a prototype of new weather radar equipped with an active phased array antenna using digital beam forming technique. With this phased array weather radar, it takes only 30 seconds to finish a volume scan of the cylindrical space within a radius of 80 km and height of 15 km. We have started experimental operation in Chiba city about 45 km east away from the center of Tokyo, where we had installed the radar in the summer of 2015. In the experiments, we have succeeded in observing severe storm cases, where inside of developing stage of cumulonimbus were clearly revealed.

1. まえがき

近年、都市部において、局地的豪雨や竜巻、雹（ひょう）といった激しい気象現象による災害が多発しており、社会的な問題となっている。こういった自然災害を軽減するために、激しい気象現象に対する防災情報の迅速な発信が必要とされている。とりわけ気象レーダーには、激しい気象現象をもたらす積乱雲の3次的な観測（ボリュームスキャン）が求められている。

従来のパラボラアンテナを用いた気象レーダーにおいては、5～10分ごとのボリュームスキャンが行われ、その結果から豪雨の発生、発達を予測する様々な研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。一方で、積乱雲は10分程度で急速に発達することがあり、大きいものでは高度十数キロメートルに達することがある⁽³⁾。よって、その内部変動を正確に捉え、発生、発達をより正確に予測するためには、従来のレーダーの時間分解能ではまだまだ不十分と言える。

当社では、従来のパラボラアンテナに代えて、フェーズドアレイアンテナを採用したXバンド気象レーダー（以下、フェーズドアレイ気象レーダー）の試作機を独自に開発した（図1）。開発したフェーズドアレイ気象レーダーは、高度15 km、半径80kmの3次元空間を30秒と高速にボリュームスキャンでき、高層まで発達する積乱雲を立体的かつ短時間で

観測することができる。本稿では、まずフェーズドアレイ気象レーダーのボリュームスキャンについて説明し、次にレーダーの仕様と装置構成について述べる。そして、観測事例から従来レーダーとの違いについて述べる。

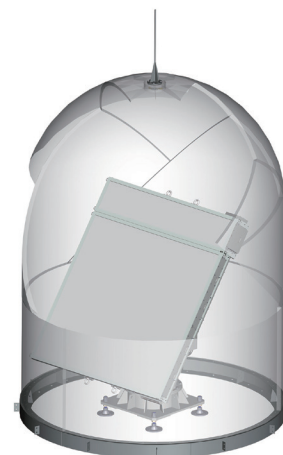


図1 フェーズドアレイ気象レーダーの外観
Fig.1 Appearance of Phased Array Weather Radar

2. フェーズドアレイ気象レーダーのボリュームスキャン

開発したフェーズドアレイ気象レーダーと従来の気象レーダーのボリュームスキャンの違いを図2に示す。

従来のパラボラアンテナ式の気象レーダーでは、アンテナを方位方向に1回転させるごとにアンテナの仰角を機械的に動かし、複数回の回転データを合成し、ボリュームスキャン結果を得ていた。20秒で1回転させ、5分ごとに15仰角をスキャンするのが一般的である。

フェーズドアレイ気象レーダーでは、アンテナを仰角方向に動かさなくても電子的にスキャンすることができる。アンテナを機械回転させながら、所定の角度ごとに仰角方向をスキャンし、それらを合成することで、1回転させるだけでボリュームスキャン結果を得ることができる。

フェーズドアレイ気象レーダーでは仰角方向を電子的に高速スキャンするために、デジタルビームフォーミング技術を採用している。これは、フェーズドアレイアンテナの指向性（ビーム）の形成を、各受信アンテナ素子で受信した信号をAD変換した後に処理プロセッサ上で行う技術である。処理プロセッサ上で受信信号を並列化し、振幅位相を調整することで、複数のアンテナビームを同時に形成できる。開発した気象レーダーでは、仰角方向にビーム幅の広い送信ビームを形成し、その中に受信ビームを複数同時に形成している（図3）。たとえば10ビーム同時に形成すれば、パラボラアンテナで10回転させた分のデータを一度に得ることができる。送信ビームの仰角方向を、低仰角から順次高仰角まで電子的にごく短時間で切り替えていくことで、仰角方向のスキャンが瞬時に完了する。

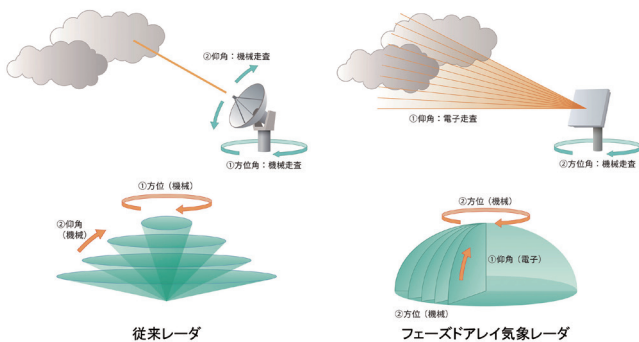


図2 フェーズドアレイ気象レーダー（左）と従来レーダー（右）のボリュームスキャンの違い

Fig.2 Volume Scan differences between Phased Array Weather radar and Parabolic Weather Radar

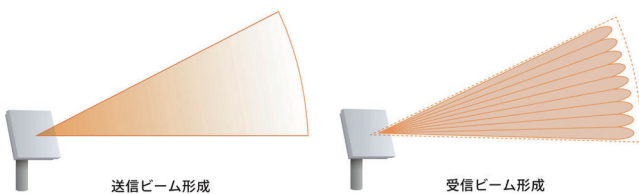


図3 デジタルビームフォーミングによる複数受信ビーム形成
Fig.3 Simultaneous Multi-beam Formation by Digital Beam Forming Volume Technique

3. 仕様と装置構成

開発したフェーズドアレイ気象レーダーの仕様を表1に示す。開発したレーダーは、最短10秒で1回のボリュームスキャンを完了できる。回転速度を速くすれば、その分、時間分解能を上げることが可能である。一方で遠くまで観測しようとする、パルス送信間隔を長くしなければならず、各方向における送信パルス出力数が減ってしまうため、エコー強度といった観測値の精度を悪化させてしまう。そのことを加味し、送信尖頭電力は最大1600Wとし、1周10秒での回転時は半径30km程度まで、1周30秒での回転時は半径80km程度まで、高度は15km程度までの範囲を観測することを想定している。

開発したレーダーは高時間分解能であるだけでなく、高空間分解能のデータ解析が可能である。最短75 mのレンジ分解能のパルスを送信し、50mごとに気象プロダクトを出力できる。また標準的な仰角方向のスキャン数は1周につき360方向である。

アンテナについては、既設の気象レーダー⁽⁴⁾を考慮し、水平ビーム幅は約1度とし、垂直ビーム幅も約1度から形成できるようにした。仰角方向の観測範囲は-5度から87度程度であり、アンテナ素子に採用しているスロットアレイアンテナの指向特性により、天頂方向のごく限られた範囲は観測範囲から除外される。偏波に関しては、単偏波、水平方向のみである。

開発したレーダーは、空中線装置とデータ処理ワークステーションにより構成され、構成自体はシンプルである（図4）。空中線装置の前面は、アンテナ面であり、導波管スロットアレイアンテナが垂直方向にスタックされている。背面には送信機、受信機、及び送受信の制御や受信信号をAD変換するデジタル回路等を積載している。また、外部にアンテナ部を回転させる制御装置を備える。各受信アンテナで受信した信号は、AD変換され、データ処理ワークステーションに転送される。データ処理ワークステーションは、この一台で、空中線装置の制御・監視、受信した信号のデジタルビームフォーミング処理と気象プロダクトへの変換機能を持つ。更に、レーダーの監視制御、データ処理をさせながら、リアルタイムに降雨状況を確認できるクイック機能も搭載している。

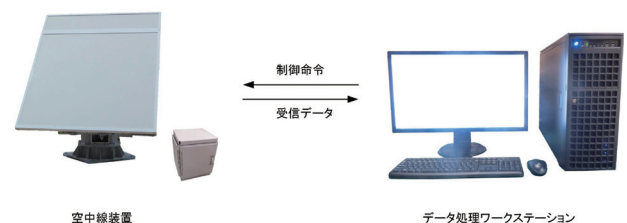


図4 レーダー装置の構成
Fig.4 System Components

表1 レーダー装置仕様

Table 1 Specification of Radar Equipment

項目	仕様
送信周波数	9.4GHz
回転速度	最短1周10秒
想定観測範囲	高度15km程度まで 半径30km程度まで (1周10秒回転時) 半径80 km程度まで (1周30秒回転時)
送信尖頭電力	最大1,600W
距離分解能	75 m/100m/150m
処理分解能	50m
標準的な仰角方向スキャン数	1度ごと360方向
水平アンテナビーム幅 (送受)	約1度
垂直アンテナビーム幅 (受信)	約1度
仰角方向観測範囲	-5度から87度
偏波	水平偏波
外形寸法	2.5×1.8×3メートル

4. 観測事例

開発したフェーズドアレイ気象レーダーについて、2015年7月に無線局の免許を取得し、千葉県千葉市に設置し、同年8月下旬から試験観測を開始している (図5)。



図5 千葉市内に設置したフェーズドアレイ気象レーダー
Fig.5 Phased array weather radar installed in Chiba city

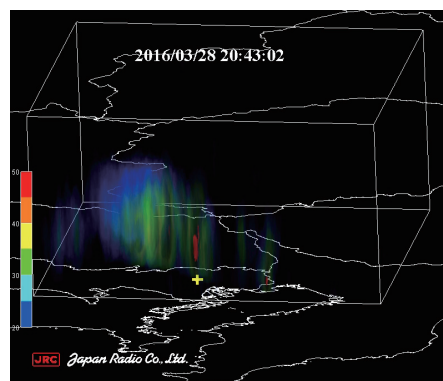
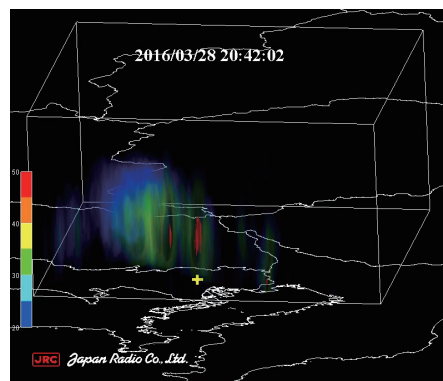
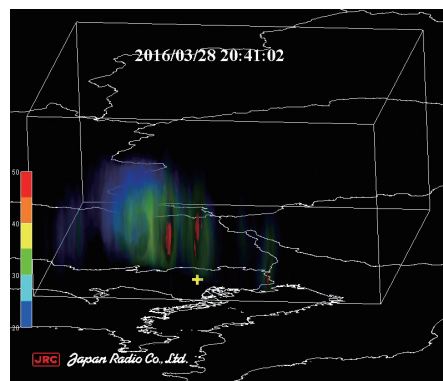
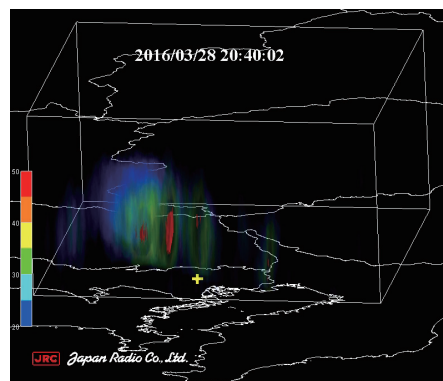


図6 2016年3月28日夜に東京近郊で発達した積乱雲の20時40分から1分ごとのエコー強度の3次元画像。レーダー設置位置より北西部80km四方、高さ10kmまでを表示 (白枠内)。十字は新宿の位置。

Fig.6 Time-series 3D images of reflectivity of a thunderstorm at March 28, 2016. Echoes from the square box area in the northwest of the radar are shown. The square box area size is 80km×80km×10km. The marker indicates Shinjuku.

急速に積乱雲が発達した事例として、2016年3月28日夜に東京近郊で発達した積乱雲の観測例について示す。このとき、開発したフェーズドアレイ気象レーダーで80kmの範囲を30秒ごとに観測していた。図6は20時40分からの1分ごとのエコー強度の変化を3次的に示すものである。わずかな分秒の間に、新宿上空に強エコー域が発生し、下降しており、従来レーダーの5分ごとのボリュームスキャンでは時間分解能が不足しているためこのような様子をとらえることはできない。この時間帯に、インターネット上に新宿付近の降雹に関する投稿が多数あったことから、強エコー域は雹だった可能性がある。フェーズドアレイ気象レーダーでは、本事例のように、激しい気象現象を引き起こす積乱雲の発生・発達の様子をより早い段階から捉えることができているのがわかる。

5. あとがき

本稿では、当社が独自に開発した3次元空間を高速にスキャン可能なフェーズドアレイ気象レーダーの概要と観測例について述べた。開発したフェーズドアレイ気象レーダーでは、高度15km、半径80kmの範囲を30秒で観測でき、従来の時間分解能では観測が難しい、積乱雲内における強雨域の発生や下降の状況を、より正確な位置で観測できることを示した。開発したレーダーの観測データを活用することで、激しい気象現象の防災情報をより早い段階から正確な位置情報と共に発信することが可能になると期待できる。

一方で開発したフェーズドアレイ気象レーダーは、単偏波レーダーであるので、国土交通省のXバンドMPレーダーといった現在配備されている2偏波レーダーと比較すると、定量的な雨量換算や、雨、雪、雹といった粒子判別には対応していない。今後、こういった課題に対しても取り組んでいく予定である。

当社では、今後数年間、開発したフェーズドアレイ気象レーダーで試験観測を実施する予定である。現在、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの鷹野教授、樋口准教授らの研究チームと共同研究を行っており、雲レーダー、ひまわりの画像といった複数センサによる観測網に、開発したフェーズドアレイ気象レーダーを加えることで、積乱雲の外観的特長や内部構造、発達の様相を明らかにし、激しい気象現象の発生予測に役立てていく予定である(図7)。

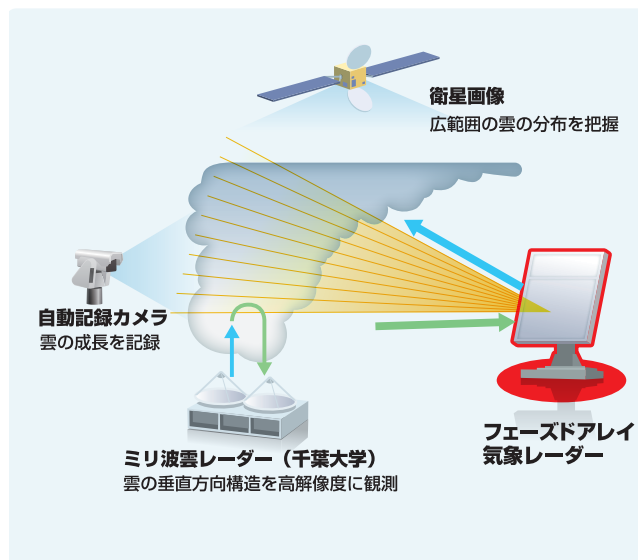


図7 千葉大学との研究観測イメージ

Fig.7 Schematics of Observation Project with Chiba University

参考文献

- (1) 気象庁, 高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について, 測候時報 第81巻, 55, 2014
- (2) 中北ほか, ドップラー速度を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 京都防災科学研究所年報, 第55号B,319, 2012
- (3) Kobayashi et al, isolated Cumulonimbus Initiation Observed by 95-GHz FM-CW Radar, X-band Radar, and Photogrammetry in the Kanto Region, Japan, SOLA, 7, 125, 2011
- (4) 長田正嗣, 河原登, 羽田利博, 気象庁向け気象ドップラーレーダー, 日本無線技報, No.58, pp.17-20, 2010

用語一覧

DBF: Digital Beam Forming (デジタルビームフォーミング)