

# 局地的豪雨の盛衰を立体的に捉える フェーズドアレイ気象レーダ

Phased-Array Weather Radar for 3D Observation of Life Cycle of Local Torrential Downpours

水谷 文彦

升田 康晴

半田 浩規

■ MIZUTANI Fumihiko

■ MASUDA Yasuharu

■ HANDA Hironori

ゲリラ豪雨や竜巻など、短時間で突発的に発生する局地的な気象現象をもたらす主な原因は積乱雲であり、そのライフサイクルは10～30分程度と短い。そのため、積乱雲の盛衰を気象レーダで捉えるには、1分以内という高速で、高層までの3次元観測が求められている。

このニーズに応えるため、128本のスロットアンテナによるデジタルビームフォーミング (DBF) 技術を採用するとともに、垂直方向には電子走査技術を併用することで、仰角0～90°の範囲をほぼ同時に観測できるフェーズドアレイ気象レーダを開発した。これにより、半径60 km、高度14 kmまでの気象現象を、アンテナを方位方向に1回転させるだけで隙間なく観測できるようになり、観測に要する時間もわずか10～30秒に短縮できた。

Sudden and unexpected weather events such as torrential rain and tornadoes are mainly caused by cumulonimbus clouds that rapidly grow in a short time of about 10 to 30 minutes. Weather radars are therefore required to conduct precise three-dimensional (3D) observations of the life cycle of cumulonimbus clouds extending to a high altitude, within a time frame of one minute.

Toshiba has developed a phased-array weather radar for 3D weather observations that is equipped with a phased-array antenna consisting of 128 slotted waveguides, offering high-speed observation with high spatial resolution. By applying a digital beam forming (DBF) technology combined with electronic scanning in the vertical direction, the radar can simultaneously observe an elevation range of 0 to 90 degrees. As a result, it is capable of weather observation within a radius of 60 km and at altitudes up to 14 km with only one horizontal rotation of the antenna, while reducing the time required for observation to only 10 to 30 seconds.

## 1 まえがき

近年、局地的豪雨や突風、竜巻などによる気象災害が増加しているが、このような災害を未然に防いだり減じたりするために気象レーダは大きな役割を担っている。こうした局地的な極端気象は、主に発達した積乱雲により引き起こされることから、気象レーダによって積乱雲を観測して、その発達状況や内部構造を監視することが求められている。また、気象レーダの観測データは、近い将来の降水予測などに活用できる可能性もあり、気象レーダへの期待が更に高まる結果となっている。

一般に、一つの積乱雲が生じてから消滅するまでの時間 (ライフサイクル) は、30分程度とかなり短いことが知られている。これに対して、従来からあるパラボラアンテナ型の気象レーダは、積乱雲の3次元構造を捉えるために5分から10分程度の時間が必要である<sup>(1)</sup>。この観測時間で観測を繰り返すのでは、積乱雲の発達や衰退のようすを把握することは難しい。更に、従来型の気象レーダでは、5～10分の観測時間でも、観測できる仰角数が10～20程度と限られている。このため空間的な観測間隔が粗く、積乱雲の内部を詳細に観測することが難しいという課題もあった。

そこで東芝は、独立行政法人 情報通信研究機構 (NICT)

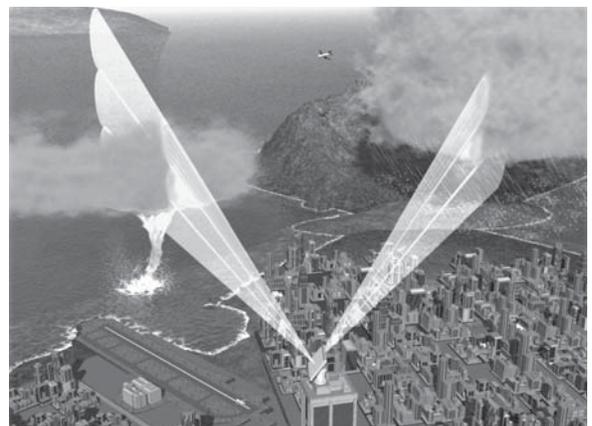


図1. フェーズドアレイ気象レーダの運用イメージー 局地的に発生するゲリラ豪雨などの3次元観測を行う。

Observation of cumulonimbus clouds using phased-array weather radar

及び国立大学法人 大阪大学 (以下、大阪大学と略記) と共同で、観測時間間隔の短縮と観測仰角数の増加を同時に実現するために、デジタルビームフォーミング (DBF) 技術<sup>(注1)</sup>を用い

(注1) アンテナのビーム形成をデジタル処理により実現する技術で、同時に複数のビーム形成も可能。

たフェーズドアレイ気象レーダを開発した。ここでは、開発したレーダの特長とフェーズドアレイアンテナの実測性能などについて述べるとともに、2012年6月から大阪地域で実施した試験観測の結果について述べる。

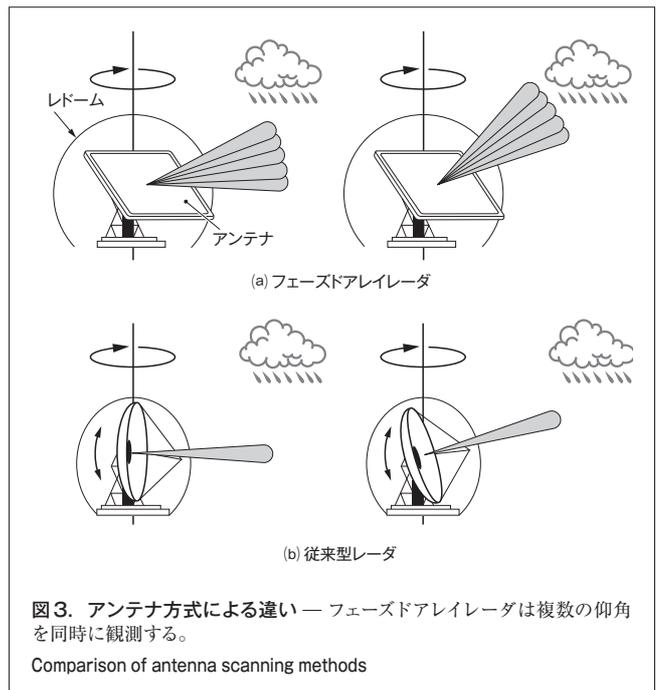
## 2 フェーズドアレイ気象レーダの特長

フェーズドアレイ気象レーダの運用イメージを図1に示す。9 GHz帯の周波数を用い、高さ2 m級のアンテナは、特に被害が大きくなる都市域で発生する局地的豪雨や突風、竜巻などの気象現象（シビアストーム）を下層から上層までリアルタイムに捉えるために、通常は都市域のビルや鉄塔の上に設置される。開発したフェーズドアレイ気象レーダは大阪大学に設置され（図2）、降水観測を行っている。イメージ図にはレドームを除いた形で示しているが、実際はアンテナをレドームで覆っている。

フェーズドアレイ気象レーダと従来型気象レーダとの違いを模式的に図3に示す。

従来型気象レーダは、パラボラアンテナを用いてペンシルビームと呼ぶビーム幅1°程度の電波を送受信している。このアンテナでは一つの仰角だけの観測となるため、ある仰角で方位方向に1回転させ、次に仰角を変更してまた1回転ということを繰り返して観測を行っている。このため、5分程度の観測を行っても10仰角程度の観測しかできず、3次元空間全てを埋めることができなかった。

この課題に対して開発したフェーズドアレイ気象レーダは、1次元フェーズドアレイアンテナを採用している。全方向全てを電子的に走査するのではなく、方位方向は機械駆動とし、仰角方向は電子走査するものである。電子走査は、仰角ビーム幅の広いファンビームを送信し、DBFによって送信ファンビームが照射する仰角範囲に複数ビームを信号処理して形成し、降水粒子などから反射した電波を一度に受信して複数仰角を同時観測する。方位方向に1回転して観測することで、10～



30秒で円筒形の3次元空間全てを観測することができる。すなわち、仰角方向にファンビームを用いて、下層から上層まで複数の仰角に電波を一度に放射し、受信側は、DBF技術を用いて受信したい仰角だけに複数のペンシルビームを形成するマルチビームを形成する。こうしてアンテナを1回転するだけで、所定の範囲の3次元空間を隙間なく観測できることがこのレーダの特長である。

フェーズドアレイ気象レーダの主な仕様を表1に示す。観測レンジ約20 km、高度14 kmの円筒形をした空間を、10秒周期で観測する“高速モード”と、観測レンジ約60 km、高度14 kmの円筒形をした空間を30秒で観測する“広域モード”を備えている。

観測レンジについては、全国的に展開されている5 GHz帯気象レーダであれば300 km程度の観測はできるが、遠方の観測を実施した際には、地球が球体である影響から大気下層の観測が難しくなることと、空間分解能が悪くなることから、



表1. フェーズドアレイ気象レーダの主な仕様  
Main specifications of phased-array weather radar

項目	仕様	
送信出力	430 W以上	
送信周波数	9.320 ~ 9.445 MHz (5 MHz間隔)	
ビーム幅	約1°	
運用モード	高速モード	広域モード
	観測レンジ	約20 km / 60 km
	観測時間	10秒 / 30秒
	ヒット数	約10 / 約20
	観測仰角数	約100 / 約100

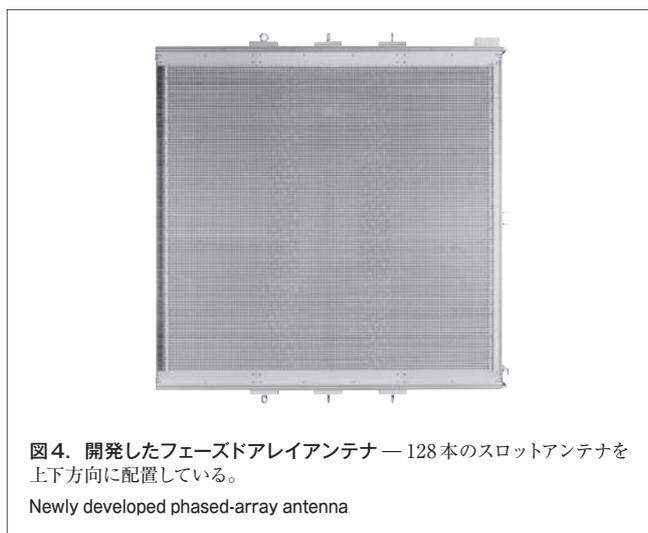
今回のフェーズドアレイ気象レーダの観測範囲は最大60 kmと  
している。このレーダの広域モードと60 km程度を観測する  
従来型の気象レーダを、観測仰角数と観測時間間隔の視点で  
比較すると、観測仰角数は従来の10から100へと約10倍に多  
くなり、かつ観測時間間隔は5分から30秒へと約1/10に短く  
なっており、結果として約100倍の性能向上を達成していると  
言えよう。

### 3 フェーズドアレイアンテナ

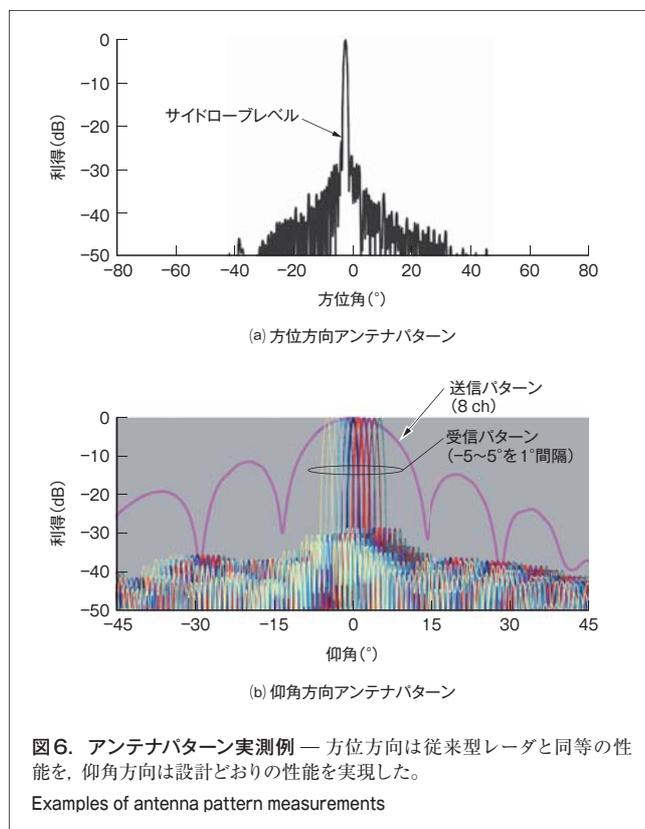
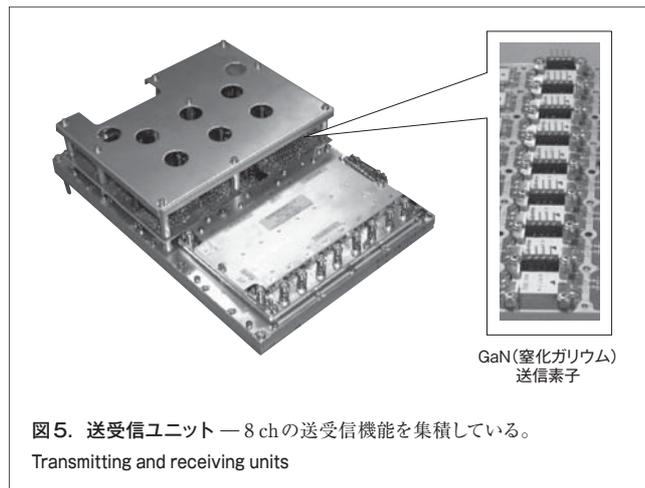
今回開発したフェーズドアレイアンテナの外観を図4に示  
し、その特長を以下に述べる。上下方向にスロットアンテナを  
約17 mmピッチで128本配置し、アンテナ開口面の高さは約  
2 mである。

このアンテナの背面には、フェーズドアレイ気象レーダにお  
ける電波の送信機能や受信機能を持つ送受信ユニット<sup>(2)</sup>や、  
受信アンテナパターンを信号処理して形成するDBF処理を行  
うDBFユニットなど、各ユニットが高集積に配置されている。  
一例として、8 ch (チャンネル) の送受信を同時に行う送受信ユ  
ニットの写真を図5に示す。

実測した方位方向及び仰角方向のアンテナパターンを図6  
に示す。方位方向については、送受信ともにほぼ同一のパター  
ンであり、ビーム幅約1°、サイドローブ<sup>(注2)</sup>レベル-23 dB以下  
となっている。一方、仰角方向の送信パターンについては、  
24素子 (24 chに対応する) の送信素子を用いることでアンテ  
ナ正面方向の送信の仰角ビーム幅は約4°程度となる。この  
パターンを用いて、仰角方向に電子走査ではほぼ同時に、仰角  
0°~90°までの電波送信を行うことを可能にしている。また、  
DBFで形成する仰角ビームのビーム幅はアンテナ正面方向で



(注2) 指向性の高いメインローブ (主極) に対して、方向に広がりのある利  
得の低い電波。

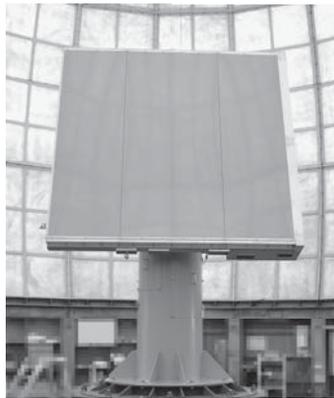


約1°である。

更に、通常は24素子で送信している送信素子数を少なくし  
て送信する仰角ビーム幅を広げることが可能である。送信ビー  
ム幅が広がったとしても、DBFで形成する受信ビーム幅は変  
わらないため、形成する受信マルチビームの数を増やすこと  
で、高速な観測結果を得ることにつながっている。

### 4 試験観測結果

開発したフェーズドアレイ気象レーダの外観を図7に示す。



フェーズドアレイアンテナ



レーダ処理装置 レーダ制御装置

図7. 開発したフェーズドアレイ気象レーダー アンテナはレドーム内に、その他の装置は室内に設置される。

Newly developed phased-array weather radar

アンテナ面のチルト角を仰角 $30^\circ$ に固定し、仰角方向 $-30^\circ \sim +60^\circ$ の範囲を電子走査して送受信することで、仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$ までを隙間なく観測することができる。このシステムによって、空間分解能は20 km先で約500 m、60 km先で約1.3 kmとなり、積乱雲の3次元構造を把握するうえで重要なレーダ反射因子などのデータを最短10秒で取得することが可能になった。

開発したレーダーは、現在大阪大学内のビル屋上に設置し、試験観測を実施している。図8に示す2012年7月26日の事例では、一つの積乱雲エコーの大きさは水平3 km、鉛直8 km程度であるが、高度4～6 kmにゲリラ豪雨の卵とも呼ばれる降水エコーが現れた後、急激に成長しながら数分間で強い雨として地上に落下するようすを、30秒ごとに切れ目なく観測することができた。

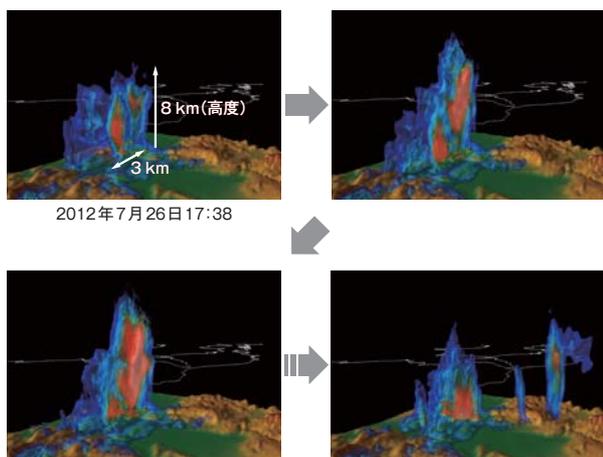


図8. 3次元降水観測の結果 — 降水エコーが急激に成長し、数分間で強い雨が降るようすを30秒ごとに観測できた。

Result of 3D precipitation observation

このように局地的な気象現象の変化を連続的に捉えることが可能になったことで、ゲリラ豪雨や突風、竜巻などの気象災害の防止に役だつことが期待される。

## 5 あとがき

ゲリラ豪雨や突風、竜巻などの原因となる積乱雲の盛衰を3次的に捉えるため、フェーズドアレイ技術を活用した新型気象レーダーを開発し、試験観測でゲリラ豪雨などの気象現象を最短10秒周期でかつ3次元で有効に観測できることを実証した。

今後は、こうした短い周期で出力される3次元観測データを動的な視点で評価するとともに、大阪大学やNICTと共同で、不要な擬似エコーを除去するためのアンテナパターンを形成する信号処理手法の開発や、いわゆる“ビッグデータ”を活用したデータアーカイブ及び解析処理や、3次元可視化の開発などに取り組み、気象防災に資するレーダシステムを提供していく。

この成果の一部は、NICTの委託研究「次世代ドップラーレーダー技術の研究開発」により得られた。

## 謝 辞

フェーズドアレイ気象レーダーの開発にあたりご協力をいただいた、NICT 電磁波計測研究所 佐藤晋介主任研究員、大阪大学 大学院工学研究科 牛尾知雄准教授に深く感謝します。

## 文 献

- (1) Mizutani, F. et al. Development of 9GHz band Solid-State Multi-Parameter Weather Radar. IEICE Technical Report. **108**, 318, 2008, p.125 - 128.
- (2) Shiraishi, Y. et al. An X-Band Transmitting and Receiving Power Amplifier Unit using GaN HEMTs for Active Phased Array Antennas. IEICE Technical Report. **110**, 390, 2011, p.109 - 112.



水谷 文彦 MIZUTANI Fumihiko

社会インフラシステム社 小向事業所 電波応用技術部主務。  
気象防災システムの開発設計に従事。  
Komukai Complex



升田 康晴 MASUDA Yasuharu

社会インフラシステム社 小向事業所 電波機器統合技術部主務。  
フェーズドアレイアンテナの開発設計に従事。  
Komukai Complex



半田 浩規 HANDA Hironori

社会インフラシステム社 小向事業所 電波応用技術部。  
気象レーダシステムの開発設計に従事。  
Komukai Complex