# フェーズドアレイレーダーを用いた降雨予測

# 牛尾知雄 (大阪大学)

# 豪雨被害(神戸都賀川事故, 2008年7月28日)









# つくば竜巻被害(2012年5月6日)





# 背景

- 近年,日本では突風や局所的な 豪雨等による被害が増加傾向に ある。
- Cバンド気象レーダのドップラー
  化



東京雑司ヶ谷での幹線工事事故 (2008年8月5日)



神戸都賀川事故(2008年7月28日)

Xバンド偏波ドップラーレーダの
 配備



サロマでのF3竜巻 (2006年11月7日)



宮崎延岡での列車脱線事故 (2006年9月17日)



# 雷放電, 豪雨や竜巻などの親は 積乱雲(Thunderstorm)

レーダリモートセンシング

こうした現象を観測し,現状把握に大きな威力を発揮するのが,レーダを代表 格とする電波リモートセンシング技術



レーダーとは

# Radar: <u>Ra</u>dio <u>d</u>etecting <u>a</u>nd <u>r</u>anging <u>電波</u>で<u>検知</u>し、<u>距離</u>を測る

光を使うと・・

Light detecting and ranging ⇒ lidar (ライダー) 音を使うと・・

Sound detecting and ranging ⇒ sodar (ソーダー) 基本的な原理は同じ

レーダの原理







# Nationwide Radar Network at S or C band



### C帯固体化気象レーダ 実機材



# Sensing Gapについて



"There is insufficient knowledge about what is actually happening (or is likely to happen) at the Earth's surface where people live." [NRC 1998]

大型レーダの利点と欠点

- 大型レーダの利点
  - 広い範囲を補償
  - 低い仰角でのサーベイ観測
- ・ 大型レーダの欠点
  - 遠距離におけるビームの拡がりに伴う分解能劣化
    - ・3次元構造の詳細な把握が×
  - 大型アンテナに伴う高速スキャンニングの難しさ
  - ・ 竜巻や集中豪雨など早く見る必要のある現象には不向き - 観測不可能領域の大きさ
    - ・レーダ近くの頭上や遠距離のおける地上付近が観測不可能

大型レーダの運用概念図

大型レーダの分解性能



# 10分毎の積乱雲の変化





# 5分毎の積乱雲の変化









# 1分毎の積乱雲の変化



# 求められる分解性能



小型レーダネットワークによるアプローチ

短距離型の高速高分解能レーダの多数配置 このネットワーク内に散在するレーダ群を仮想的な超高精度大型レーダとみなし て,様々な規模の処理や運用を行う自律分散型レーダグリッドの構築







# フェーズドアレイレーダの研究開発



10~30秒の「高速」で約100仰角の「高密度」観測に成功

TOSHIBA Leading Innovation >>>

♀大阪大學 NiCT

# 高速化の原理



#### 機械走査方式

・鋭いビーム
 →水平方向にアンテナを回転しながら、仰角を少しずつ挙げていく方式



#### <u>電子走査方式</u>

・広い送信ビーム →128本のアンテナで受信され た信号を、ソフトウェアによって、 鋭い受信ビームに絞る

# アンテナ外観・各機器



#### スロットアンテナ (アンテナ素子)







フェーズドアレイアンテナ



右:レーダ制御装置 (駆動制御・分電盤)



大阪大学に設置された フェーズドアレイレーダ(地上13階 相当)



提供:佐藤晋介, NICT



### 提供:佐藤晋介, NICT

# 時間進展(30秒毎) 2012年7月6日22時49分39秒~23時59分39秒





### 2012年7月6日 23:23:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:24:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:24:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:25:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:25:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:26:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:26:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:27:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:27:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



### 2012年7月6日 23:28:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI


## 2012年7月6日 23:28:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:29:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:29:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:30:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:30:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:31:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:31:39の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



## 2012年7月6日 23:32:09の観測結果



右図の赤い線に沿ったRHI



# 2012年7月6日 23:23:39 コア発生

## 2012年7月6日 23:32:09 地上到達







# 事例:2013年7月13日

### 線状の降水帯が大阪北部にかかり、西から東に進行



提供:吉田翔, 気象工学研究所

# 事例:2013年7月13日



東



# 事例(2014年9月11日)



### 上空で発生した積乱雲(コア1)が急速に発達

提供:吉田翔, 気象工学研究所



## 2012年07月26日,17:20~18:29の3次元降水分布

提供:東芝

# プレスリリース等

見学および視察

例:総務省政務官,内閣府審議官,総務省審議官 ,国土交通省参事等政府関係者,自治体関係者, 電機メーカ、国研、コンサルタント、国内外の大学 等

計 500人以上(2012年9月から現在までの累計)



ゲリラ豪雨 竜巻 素早く予測 新型レーダー 阪大など開発 報道機関向け説明会の様子

読売新聞 2012.9.1 (1面掲載)

TVニュース:

NHKなど 多数

#### <u>新聞:</u>

- 日経(全国)
- 読売(大阪)など多数

### 教材関係:

- NHK for School, 学ぼう防災 地球の声を聞こう(小学高学年 用)
- 『中学理科教科書』(平成28年 ٠ 以降用)啓林館,に本研究成果 が,掲載

# NBE is a perfect proxy for monitoring severe thunderstorm

20120814-061755





20120726-183846

dBZ







A many and a many an

while, they must take the strength 20, while the second strength 20, while the strength 20

Wu, T. et al., Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar, *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 40, 618–623, doi:10.1002/grl.50112, 2013

# In Nature Café 2015 report Nature, Volume 523 Number 7562



#### 積乱雲を可視化するフェーズドアレイレーダ

地上に設置したアンテナか ら電磁波(Xバンドのマイ クロ波)を発信し、雨粒で 散乱された電磁波を受信す ることで、雨粒の位置や強 度を詳細に知ることが可能 だ。ただし、従来のレーダ



では、積乱雲を三次元スキャンするためにはアンテナを、仰角を 変えて何回も回転させる必要がある。そのため、1回のスキャン に5~10分の時間を要する。それに対し、2012年に大阪大 学が東芝、情報通信研究機構と共同開発したフェーズドアレイ レーダは、128本ものアンテナを用いることにより、ソフトウェ ア的に受信ビームを絞る。したがって、アンテナは1回回転さ せるだけで三次元スキャンでき、スキャンに要する時間も20~ 30秒に短縮された。その結果、積乱雲内に雨粒が形成されて「豪 雨のコア」を生じ、その豪雨のコアが、高度を下げつつ水平に移 動し、大量の雨を地面に降り注ぐという過程をダイナミックに可 視化することに成功したのだ。現在は自治体と協力して、ゲリラ 豪雨情報をスマートフォンなどにメールで配信する仕組みを研究 している。





# Stand aloneからNetworksへ



SIP(戦略的イノベーション創造プログラム) 〔レジリエントな防災・減災機能の強化〕 「マルチパラメータフェーズドアレイレーダ等の 開発・活用による豪雨・竜巻予測情報の高度 化と利活用に関する研究」







### 事例報告)豪雨・冠水時の事前通知を実施(8/8のゲリラ豪雨)



VIL-max ・・・鉛直積算水分量の最大値(Vertically Integrated Liquid Water Content) Xraine-Accum ・・・地上雨量表示(Xrain : XバンドMPレーダ)

# ゲリラ豪雨情報メール

# ゲリラ豪雨情報配信条件

PARを用いた予測雨量と気象庁が配信する注意報・警報を用いる

	メール件名	発表されている注警報*1	予測雨量(10分雨量)* <sup>2</sup>
1	福島区内ゲリラ豪雨注意情報	大雨かつ雷	5mm以上~10mm未満
2	福島区内ゲリラ豪雨警戒情報	大雨かつ雷	10mm以上
3	福島区内ゲリラ豪雨情報 解除通知	無し	5mm未満

但し原則として、注意情報及び警戒情報は一度配信をしてから状況に変化が無い場合は 最後に配信してから5分間<sup>\*3</sup>は再度配信しない(予測自体は1分ごとに計算)。

- \*1:大雨注意報、雷注意報及び、大雨警報も含む。
- \*2:予測雨量は1時間以内に福島区内(右図参照)に 予測される最大10分雨量。

\*3:現段階では暫定的に5分と設定。





- 電磁波の偏波(垂直、水平)を用いることによって、高精度な降雨量推定および降水粒子の判別が可能となる。
- フェーズドアレイレーダの高速性と2重偏波
  レーダの正確性を両立したレーダの研究開発。







# **Dual Polarimetric Phased Array Radar**



### 空中線部(前面) 左:フィドームあり、右:なし



空中線部 (背面)

駆動部



Installed in Tokyo Metropolitan area on December, 2017

## **Application field of phased array radar**





Forecast of flash flood and controla of water supply



ダム放流(洪水調整) 【ダム管理事務所】



航空管制【航空局】 Aviation control



住民避難勧告【市町村】 Evacuation call [municipality]



下水道ポンプ制御【市町村】 Sewerage pump [municipality]





Scientific Research



次世代ドップラーレーダー技術の研究開発



列車安全運行【鉄道会社】 Train operating



一般市民への情報提供 【民間気象会社】





▶ 一連の現象を立体的かつ連続的に捉えることに成功

▶ 下降気流の形成: ローディングによる駆動+蒸発冷却による強化



# "Big Data Assimilation" Revolutionizing Severe Weather Prediction





Miyoshi et al., *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016

# 9/11/2014, sudden local rain



提供:三好健正,理化学研究所

# 9/11/2014, Torrential Rain



### 提供:三好健正,理化学研究所





# Advantages and Disadvantages

- Advantage
  - Fast scanning and dense observation
  - Early and accurate warning
- Disadvantage
  - Ground clutter contamination
  - less accurate warning
- How can we reduce this disadvantage?

## Problem 2-way beam pattern is poor

Fan beam pattern for transmitting

Receiving beam pattern by uniform phase shift



The received signal from precipitation is seriously contaminated by the relatively high received power from ground and strong precipitation echoes near by through the side lobes of the 2 way beam pattern. 72


A beam forming technique using the **MMSE** (Minimum Mean Square Error) formulation has been proposed and tested. This approach can adaptively mitigate the masking interference that results from the standard digital beam forming method in the vicinity of ground clutter and strong precipitation area

A/D

 $W_1$ 

A/D

 $w_{N-1}$ 

A/D

 $w_0$ 

 $y_0$ 

### Minimum Mean Square Error Formulation

Weighting factor is calculated by minimizing the residuals, defined as the difference between the reference and the weighting average of the received signal

$$J_{m} = E\left[\left|\mathbf{x}_{m} - \mathbf{w}_{MMSE_{m}}^{H}\mathbf{y}\right|^{2}\right] + \operatorname{Re}\left\{\lambda\left(\mathbf{w}_{MMSE_{m}}^{H}\mathbf{s}(\theta_{m}) - 1\right)\right\}$$
  
minimize  

$$\mathbf{w}_{MMSE_{m}} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta_{m})}{\mathbf{s}^{H}(\theta_{m})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}(\theta_{m})}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{SR}_{x}\mathbf{S}^{H} + \mathbf{R}_{v}$$

$$\mathbf{R}_{x}: \operatorname{Covariance of x}$$

$$\mathbf{R}_{v}: \operatorname{Covariance of noise}$$
1) Initial value  

$$\hat{\mathbf{x}}_{BF_{l,m}} = \mathbf{w}_{BF_{m}}^{H}\mathbf{y}_{l}$$
2) Calculation of weighting vector  

$$\mathbf{w}^{(i)}_{MMSE_{m}} = \frac{\mathbf{R}^{(i)-1}\mathbf{s}(\theta_{m})}{\mathbf{s}^{H}(\theta_{m})\mathbf{R}^{(i)-1}\mathbf{s}(\theta_{m})}$$
3) Weighting average  

$$\hat{\mathbf{x}}_{MMSE_{l}}^{(i)} = \mathbf{w}^{(i)^{H}}_{MMSE_{m}}$$

#### Application to real data



#### Application to real data



# Clutter mitigation with MMSE technique in doppler domain



## Phased Array or Parabolic ?



タイプ	時間分解能	空間分解能	観測密度	精度	コスト
パラボラ	×	0	×	$\Delta$	0
フェーズドアレイ	Ô	0	Ø	0	$\Delta$

まとめ

- フェーズドアレイ気象レーダは、次世代の気象レーダである。
- ・その開発の現状と将来に関して紹介した.
- 高速性能だけでなく、精度面でも優れている 可能性がある。