

# 豪雨の3次元構造を捉える フェースドアレイ気象レーダー

佐藤晋介（情報通信研究機構）

第6回 ワイヤレステクノロジーセッション  
2015年7月3日@YRPホール



## 1. はじめに

- フェーズドアレイ気象レーダの開発
- 従来型レーダとの比較

## 2. ゲリラ豪雨の3次元構造

- 30秒と5分の違い

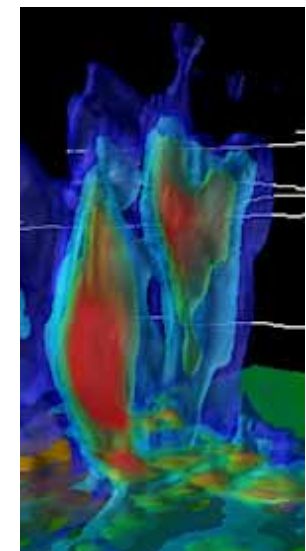
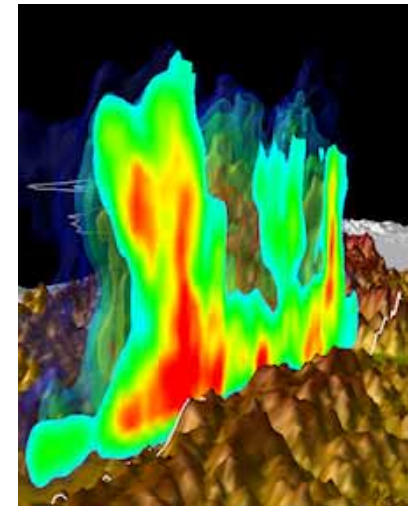
## 3. 次々と発生する積乱雲による豪雨

- 2012年8月14日の宇治豪雨
- 2013年7月13日の梅雨前線による京都大雨
- 2014年8月17日の丹波市豪雨

## 4. 突発的豪雨の早期観測を目指した新しい観測システム (PANDA)

- 2台のフェーズドアレイ気象レーダによる同時観測

## 5. 観測データのリアルタイム処理・公開



# 研究開発の背景

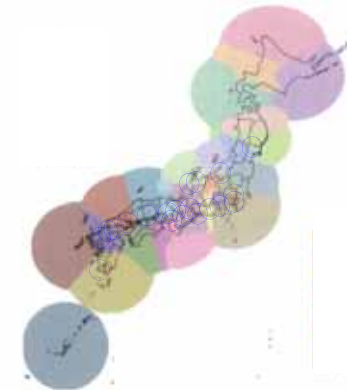
- ・ 近年、局地的大雨(ゲリラ豪雨)や竜巻による突発的・局所的気象災害が社会問題となっている。
- ・ 都市域ではXバンドMPレーダが整備され地上付近の降雨分布を1分間隔で観測。
- ・ 大雨の前兆現象や発達過程の調査研究、直前予測には3次元観測が重要であるが、従来のパラボラアンテナによるレーダでは、3次元観測に5分以上の時間を要する。



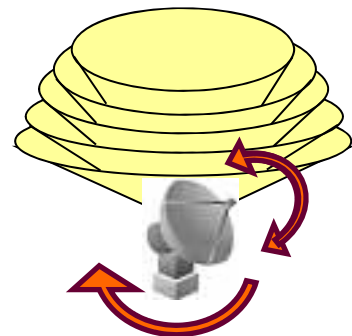
都賀川の鉄砲水(2008/7/28)



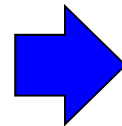
つくば市竜巻(2012/5/6)



国交省Cバンドレーダ雨量計観測網とX-バンドMPレーダの配備状況(○印)。



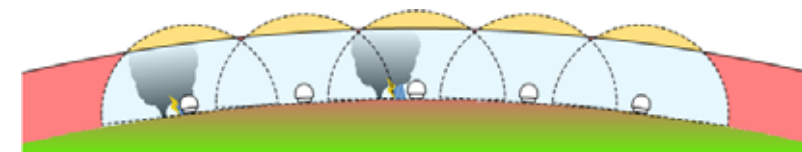
パラボラアンテナによる3次元立体観測(5~10分)



フェーズドアレイレーダーによる3次元立体観測(10~30秒)



大型レーダ観測



小型レーダによるネットワーク観測

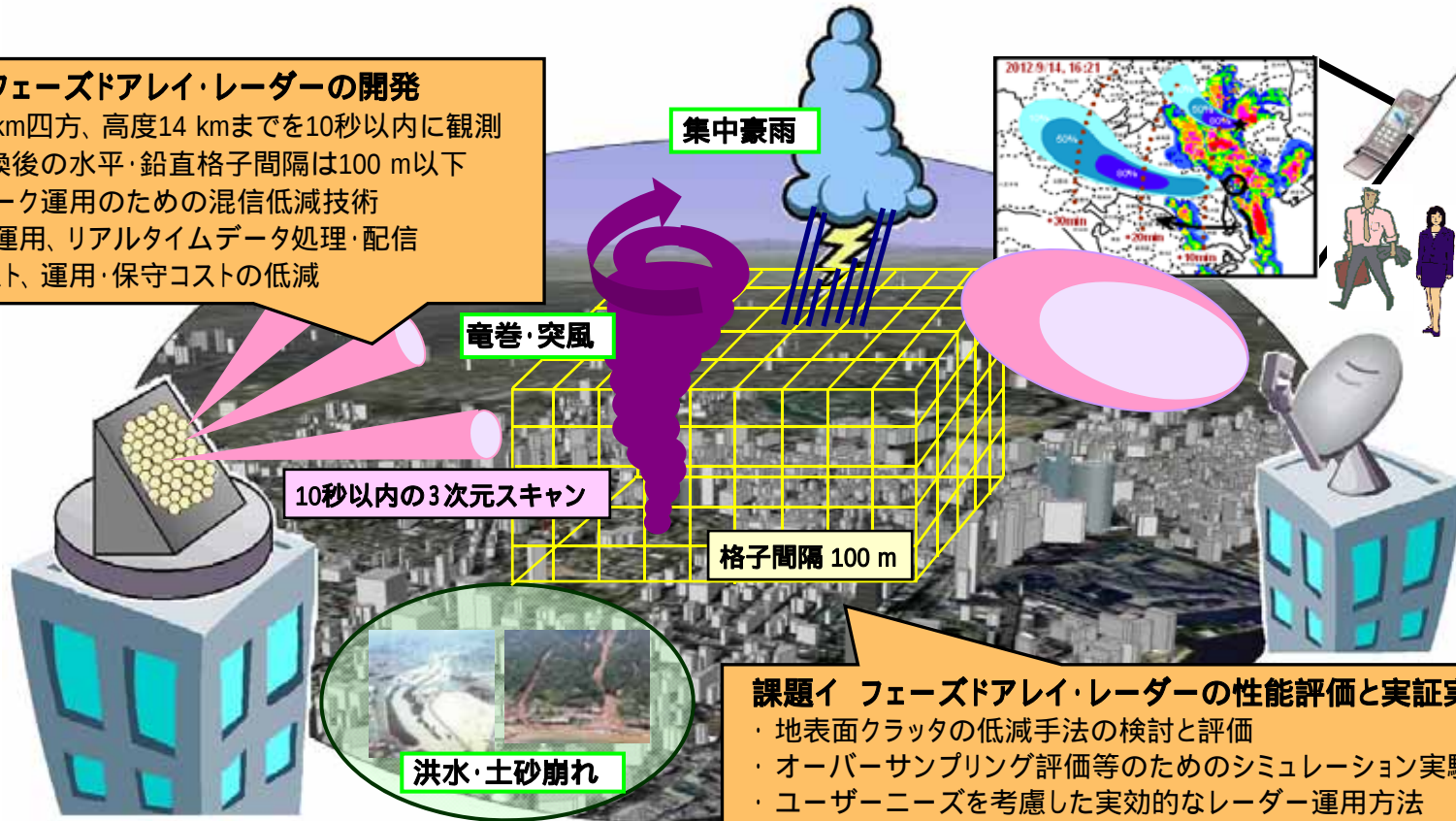
# 「次世代ドップラーレーダ技術の研究開発」

突発的、局所的気象災害の予測や災害対策のため、その原因となる集中豪雨、竜巻突風等を10秒以内に100 m以下の分解能で立体的に観測可能な次世代ドップラーレーダの研究開発を行う。

## 課題ア フェーズドアレイ・レーダーの開発

- ・ 水平30 km四方、高度14 kmまでを10秒以内に観測
- ・ 座標変換後の水平・鉛直格子間隔は100 m以下
- ・ ネットワーク運用のための混信低減技術
- ・ リモート運用、リアルタイムデータ処理・配信
- ・ 製造コスト、運用・保守コストの低減

産学官連携  
プロジェクト  
NICT  
委託研究  
↓  
東芝・  
大阪大  
が受託



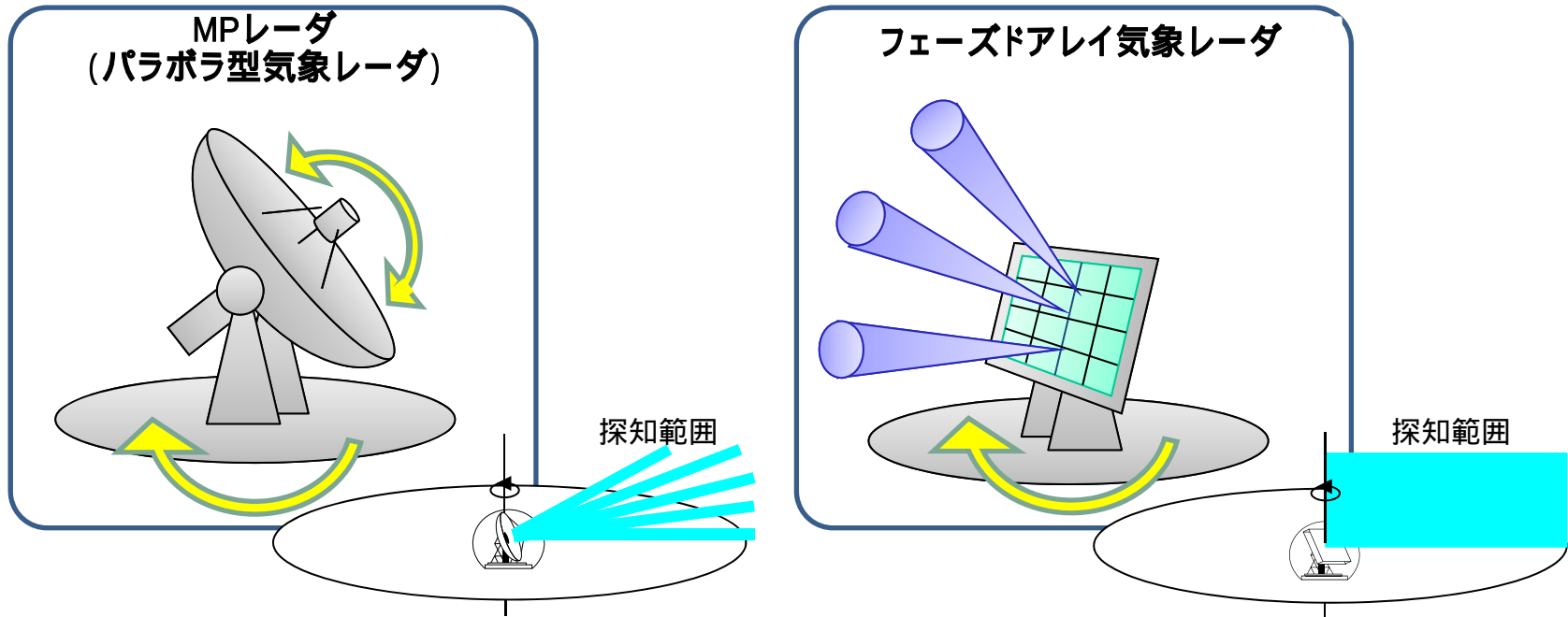
## 課題イ フェーズドアレイ・レーダーの性能評価と実証実験

- ・ 地表面クラッタの低減手法の検討と評価
- ・ オーバーサンプリング評価等のためのシミュレーション実験
- ・ ユーザーニーズを考慮した実効的なレーダー運用方法
- ・ 実証実験、実用化を目指した運用試験

## 開発スケジュール

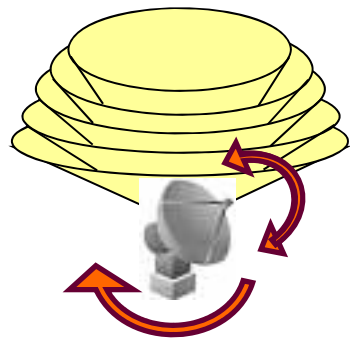
| 2008(H20)                                                                          | 2009(H21)                                                                                                      | 2010(H22)                                                                                                   | 2011(H23)                                                                                                | 2012(H24)                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 概念設計(システム検討)</li> <li>・ 素子部分試作</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 予備設計(主に空中線部)</li> <li>・ 送受信モジュール試作</li> <li>・ 性能評価シミュレーション</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 基本設計(主に信号処理部)</li> <li>・ 空中線部の製作</li> <li>・ クラッタ除去技術の開発</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 詳細設計(解析処理部)</li> <li>・ 信号処理部の製作</li> <li>・ 観測運用技術の開発</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証実験・評価</li> <li>・ データ解析処理部の開発</li> </ul> |

# MPレーダとフェーズドアレイレーダの比較

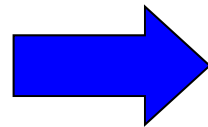


| MPレーダ (パラボラ型気象レーダ)                                                          |                | フェーズドアレイ気象レーダ                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------|
| 仰角 : 機械走査<br>方位角 : 機械走査                                                     | 走査方法           | 仰角 : <b>電子走査</b><br>方位角 : 機械走査                   |
| 3次元スキャン(約15仰角)<br>/ 5分程度 (地上は1分周期で観測)                                       | 観測空間<br>/ 観測時間 | 3次元スキャン( <b>約100仰角</b> )<br>/ <b>10秒 ~ 30秒程度</b> |
| 60 km                                                                       | 観測範囲           | 60 km                                            |
| 反射強度(降雨強度)、<br>ドップラー速度、速度幅、<br><b>偏波パラメータ (Zdr, Kdp, ρ<sub>hv</sub> など)</b> | 観測パラメータ        | 反射強度(降雨強度)、<br>ドップラー速度、速度幅                       |

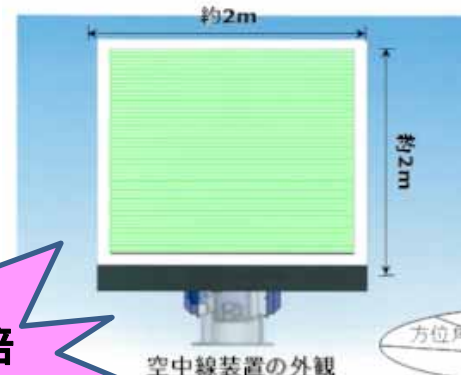
# フェーズドアレイ気象レーダー



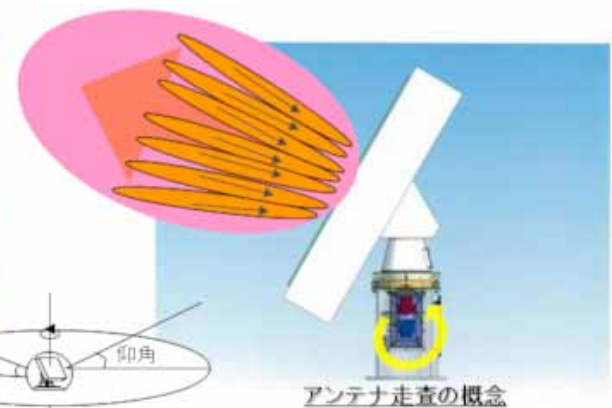
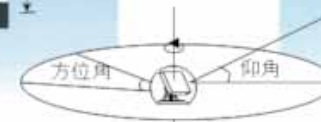
従来のパラボラアンテナ  
レーダーによる3次元観測  
(150m, 15仰角 5分)



**データ量10倍  
更新頻度10倍**



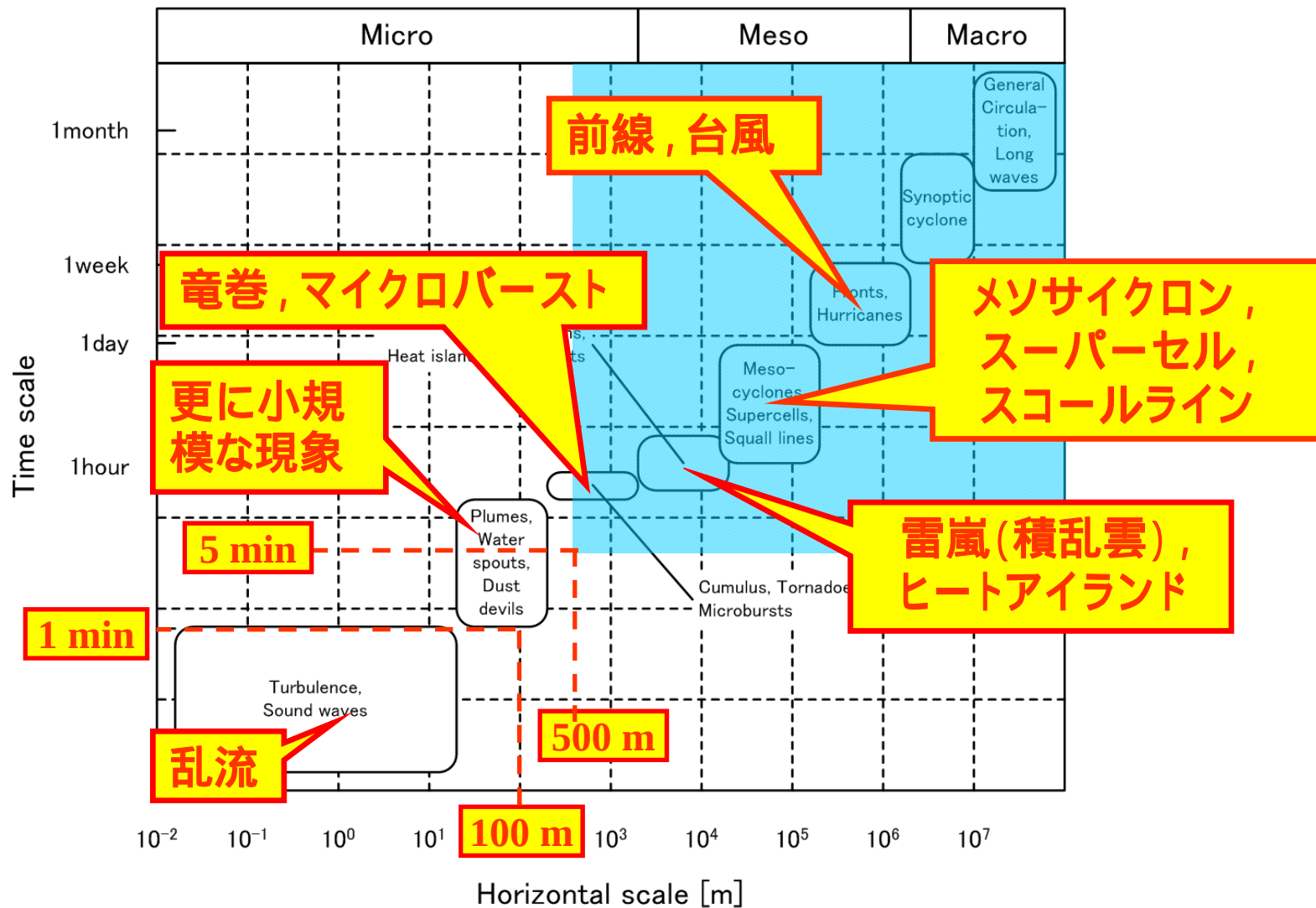
空中線装置の外観



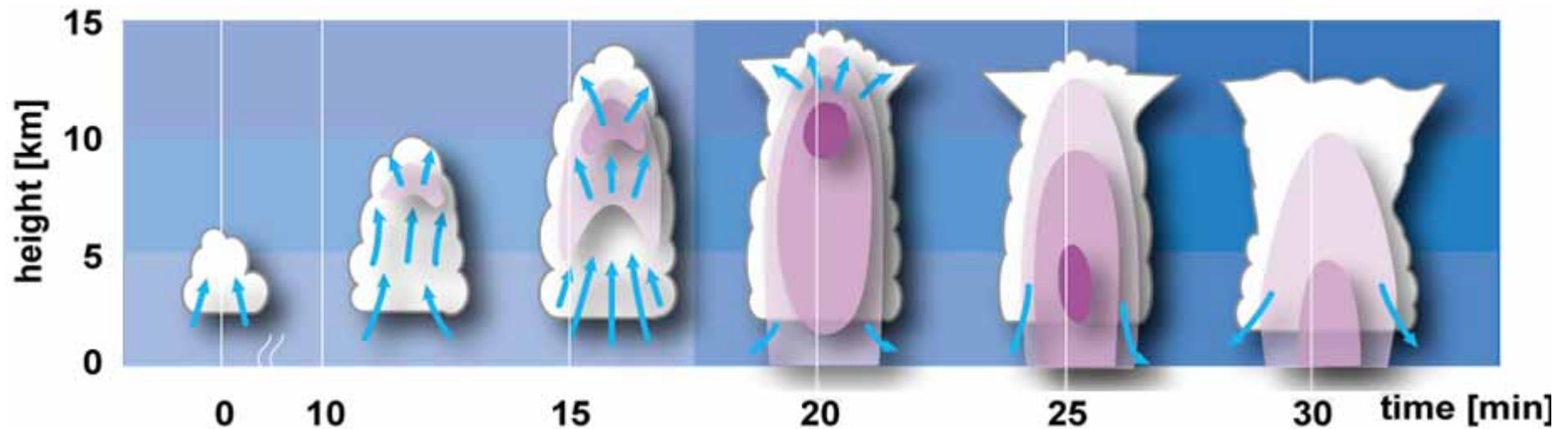
アンテナ走査の概念

1次元フェーズドアレイレーダーによる  
3次元詳細観測(100m, 100仰角 30秒)

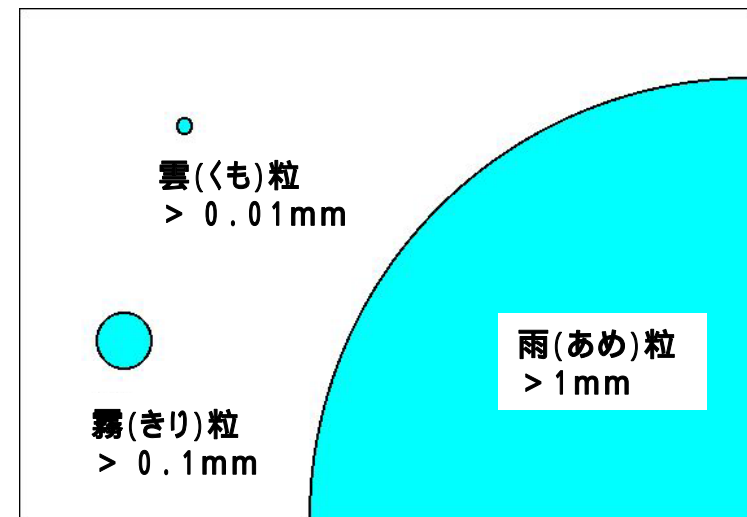
# 気象における時間・空間スケール



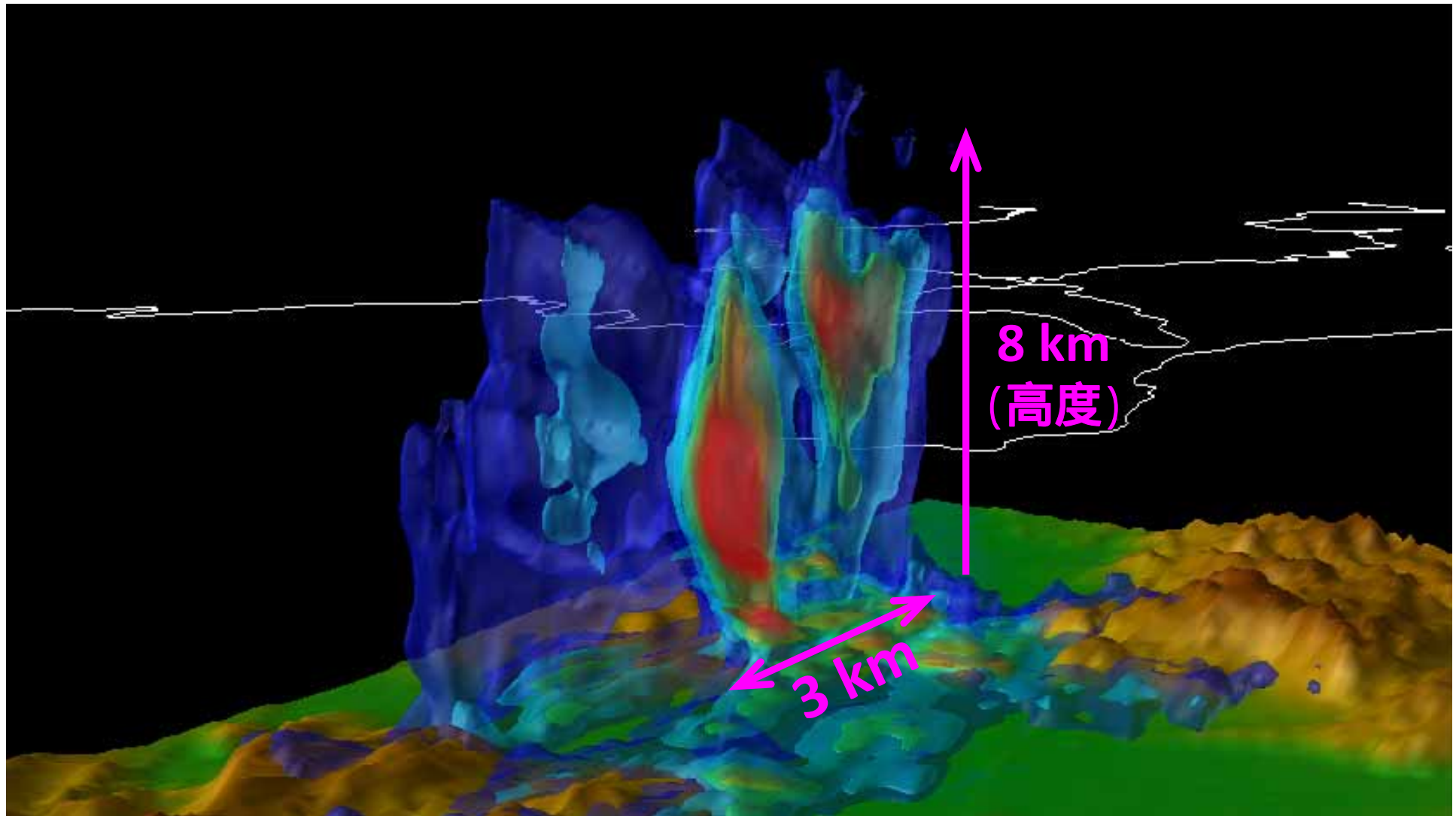
# 「積乱雲の発達」と「雨粒の成長」



- 1) 積乱雲の上層流中で雲粒が成長する.
- 2) 上層で粒径が大きくなり雨(または雪・霰)としてレーダで観測される.  
→ ファーストエコー(ゲリラ豪雨のタマゴ)
- 3) 雨滴は10分間で4~5 km落下する.
- 4) 一つの積乱雲の一生は30~60分程度.



# 孤立積乱雲による局地的大雨



2012年07月26日,17:38:16の3次元降水分布. 京都府南部の京田辺市  
付近の降雨の3次元構造を北東方向から眺める (格子間隔 100m).  
17:20:16 ~ 18:10:46の動画 (30秒間隔 / 5分間隔) .

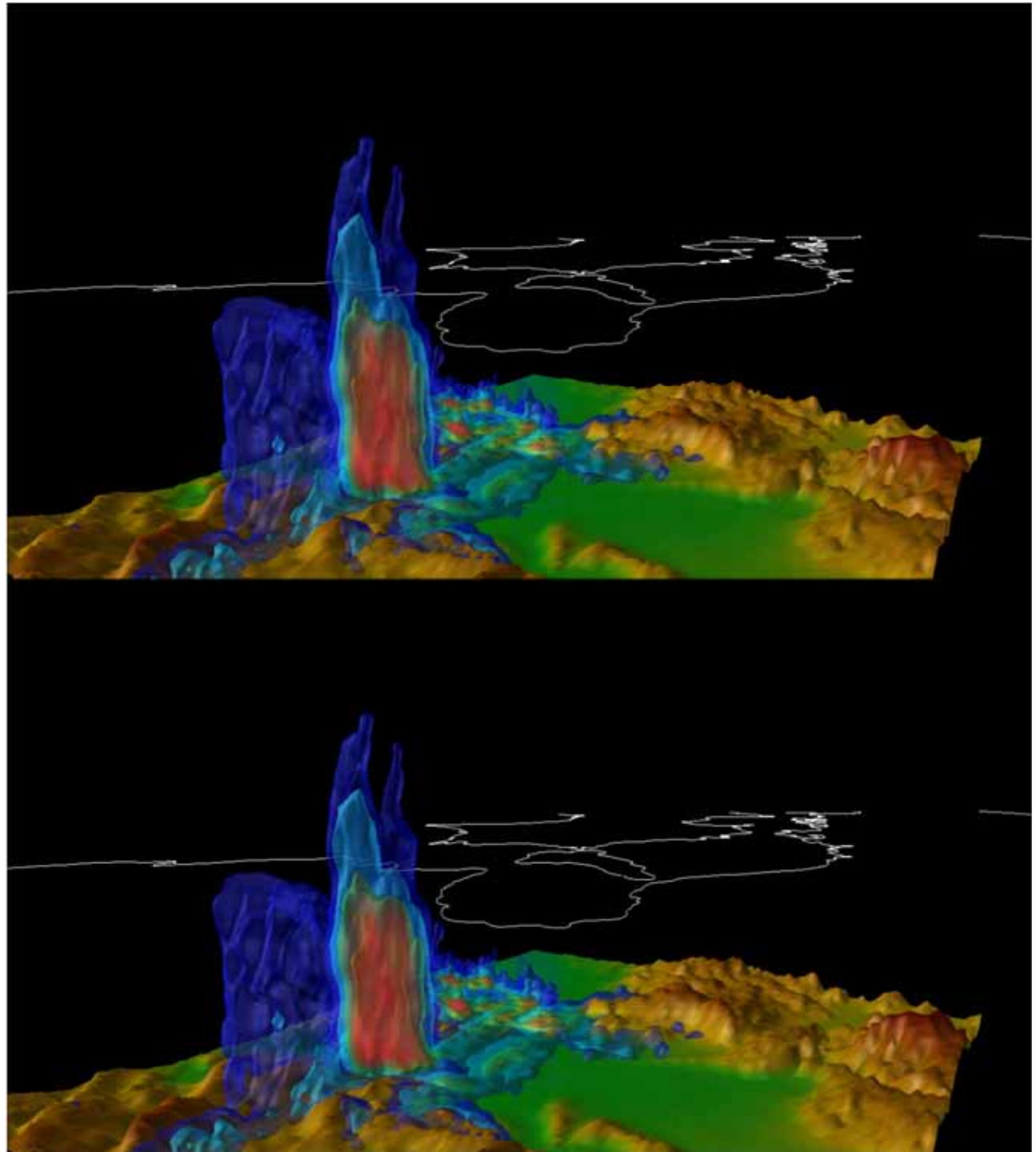


2012年07月26日  
17:20:16 ~ 18:10:46

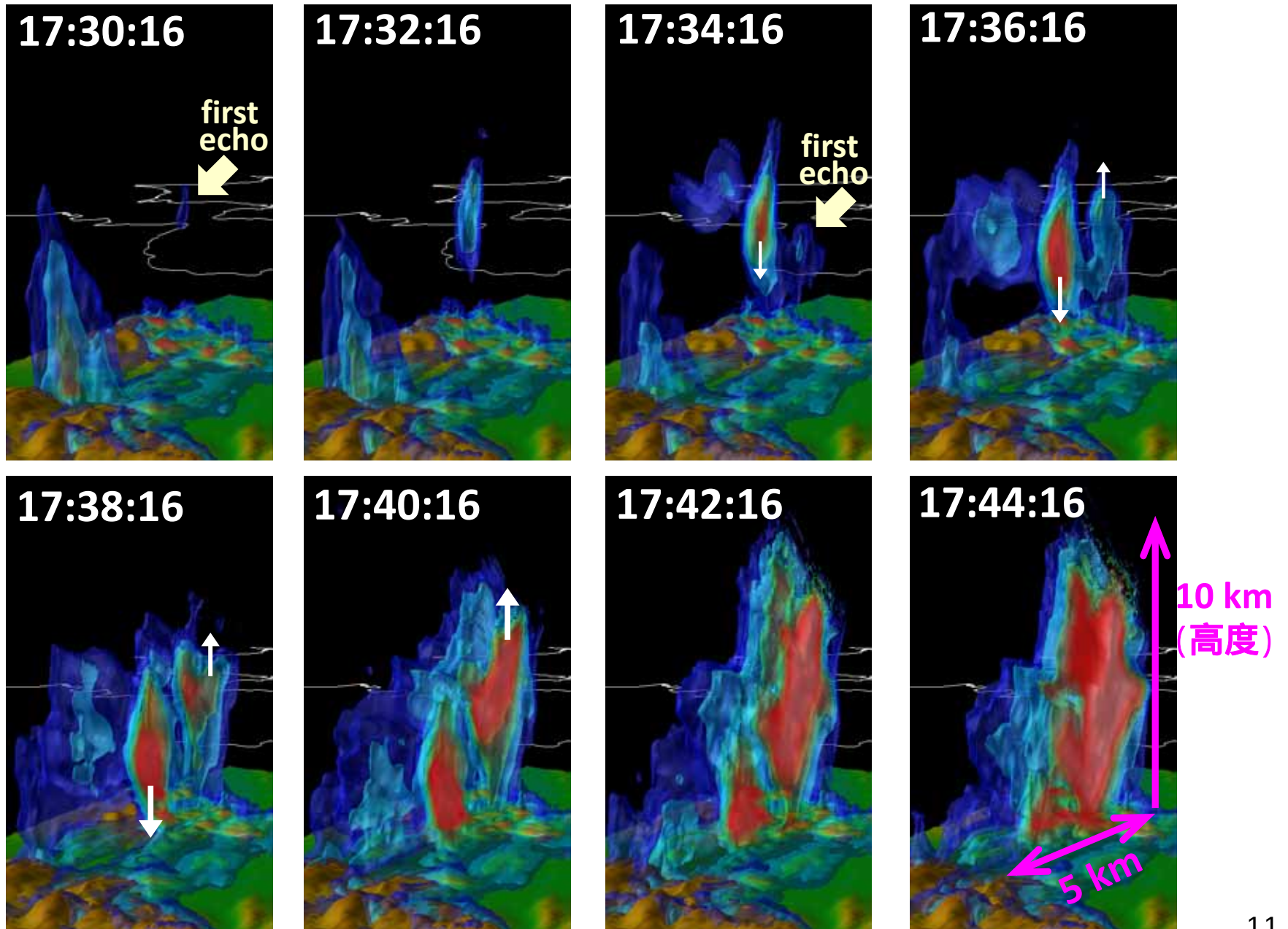
**5分毎**  
(従来レーダを模擬)

**30秒毎**

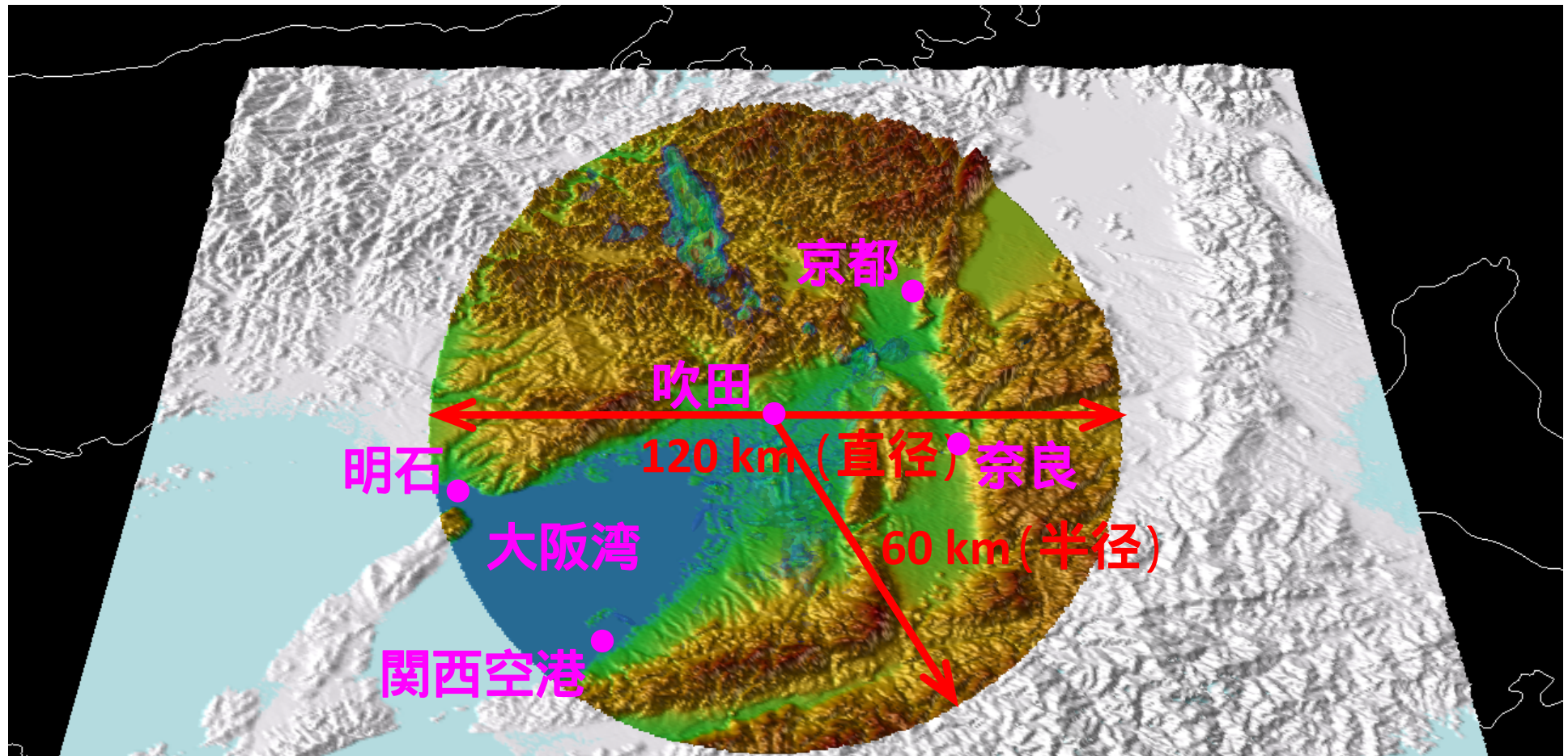
京都府京田辺市の局地的大雨  
の3次元構造を北東方向から  
眺める (格子間隔 100m) .



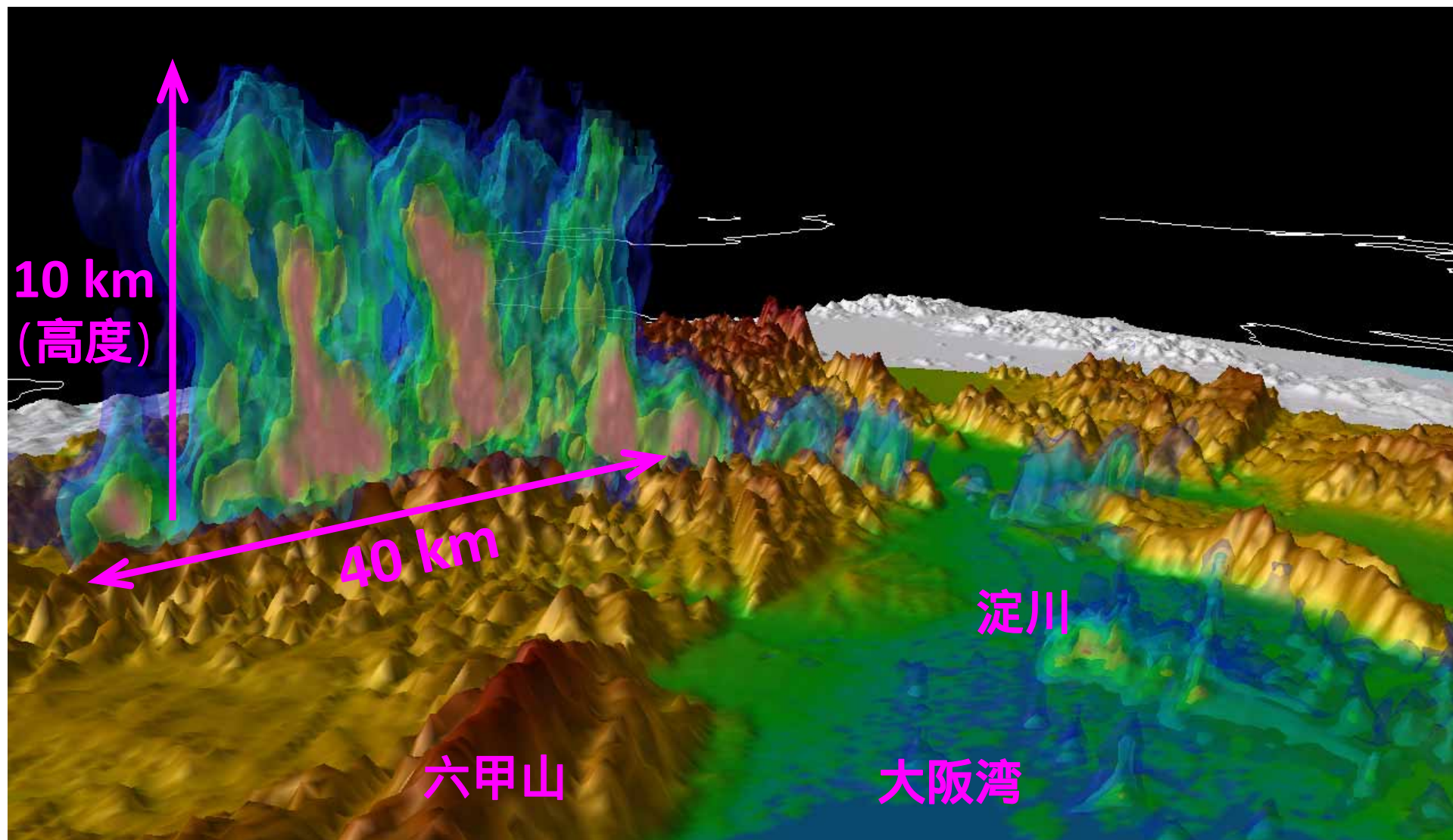
# ファーストエコーと降水の発達



# レーダの観測範囲と可視化

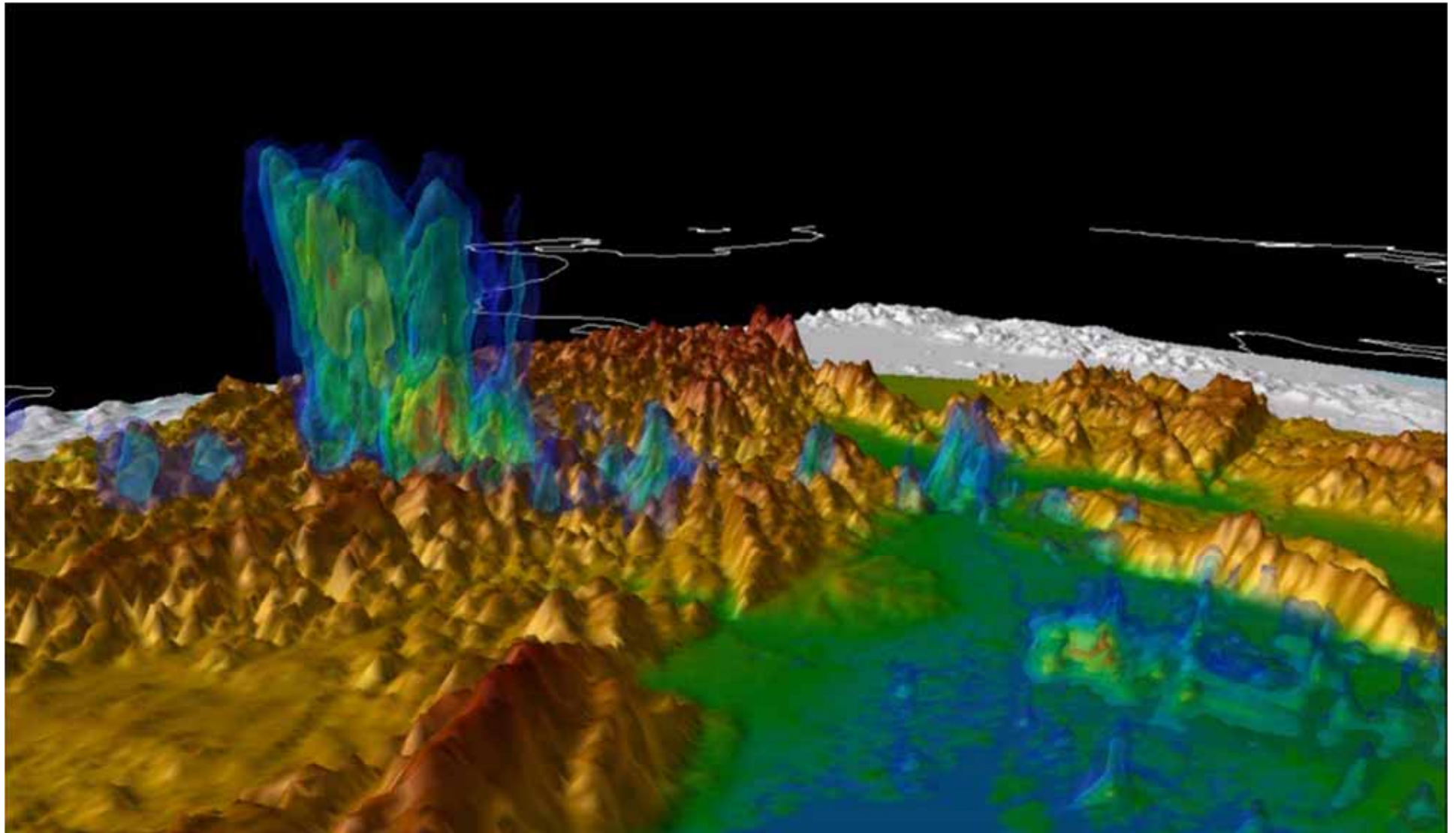


AVS / Expressによる3次元可視化のいくつかの解析例。  
カラー部分はフェーズドアレイ気象レーダの観測範囲を示す  
(地形図はSRTM - DEM)。



2012年07月22日の北摂山系における局地的大雨(京都府園部アメダスで2 時間雨量 72.5 mm)の3次元構造(反射強度)を南西から見た鳥瞰図. 18:00:20 ~ 20:00:50 のアニメーション(時間分解能は30秒).

10フレーム / 秒 → 300倍速 13

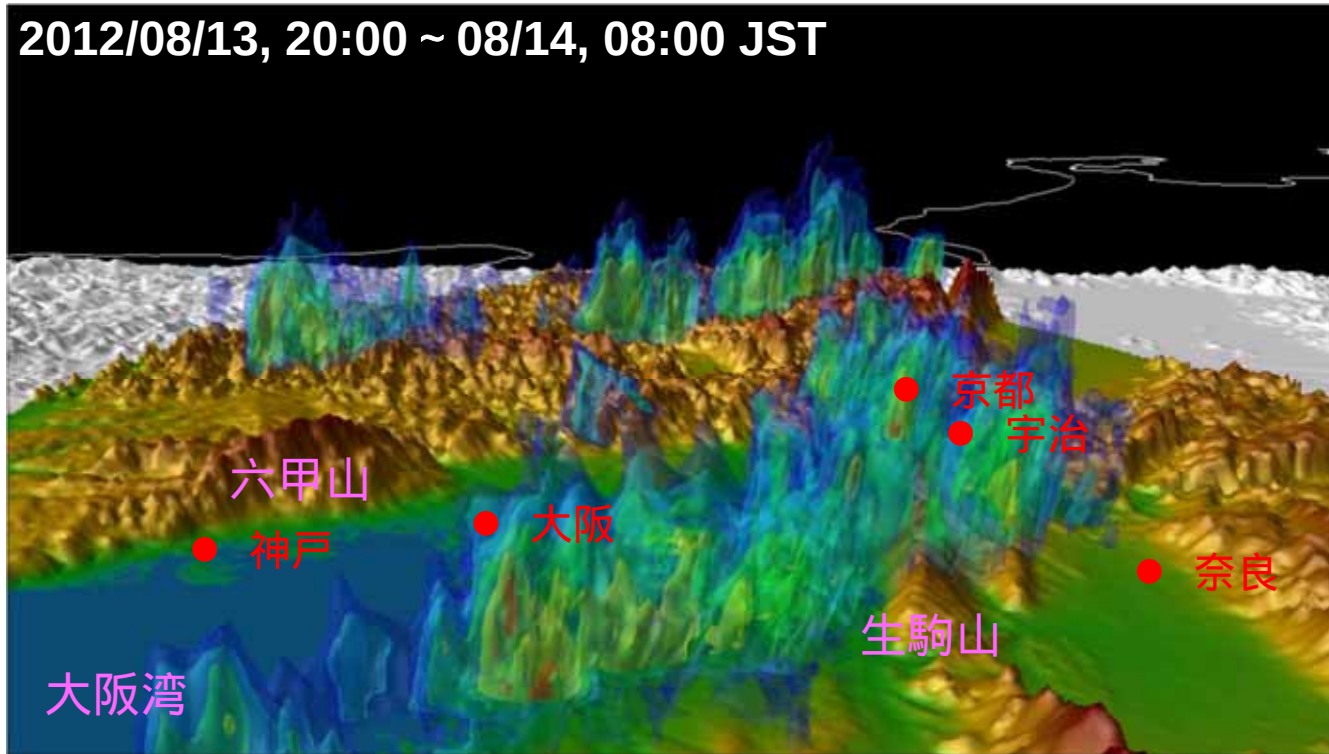


2012年07月22日の北摂山系における局地的大雨(京都府園部アメダスで2 時間雨量 72.5 mm)の3次元構造(反射強度)を南西から見た鳥瞰図. 18:00:20 ~ 20:00:50 のアニメーション(時間分解能は30秒).

10フレーム / 秒 → 300倍速 14

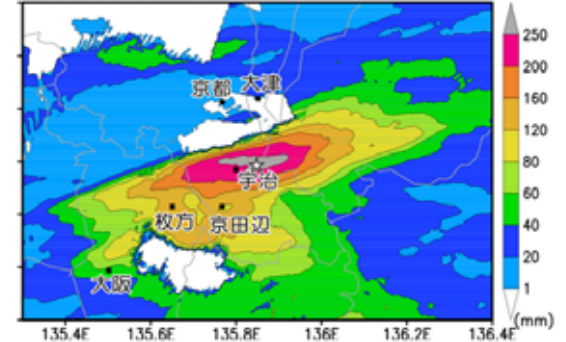
# 宇治豪雨 (2012年8月13日～14日)

2012/08/13, 20:00 ~ 08/14, 08:00 JST



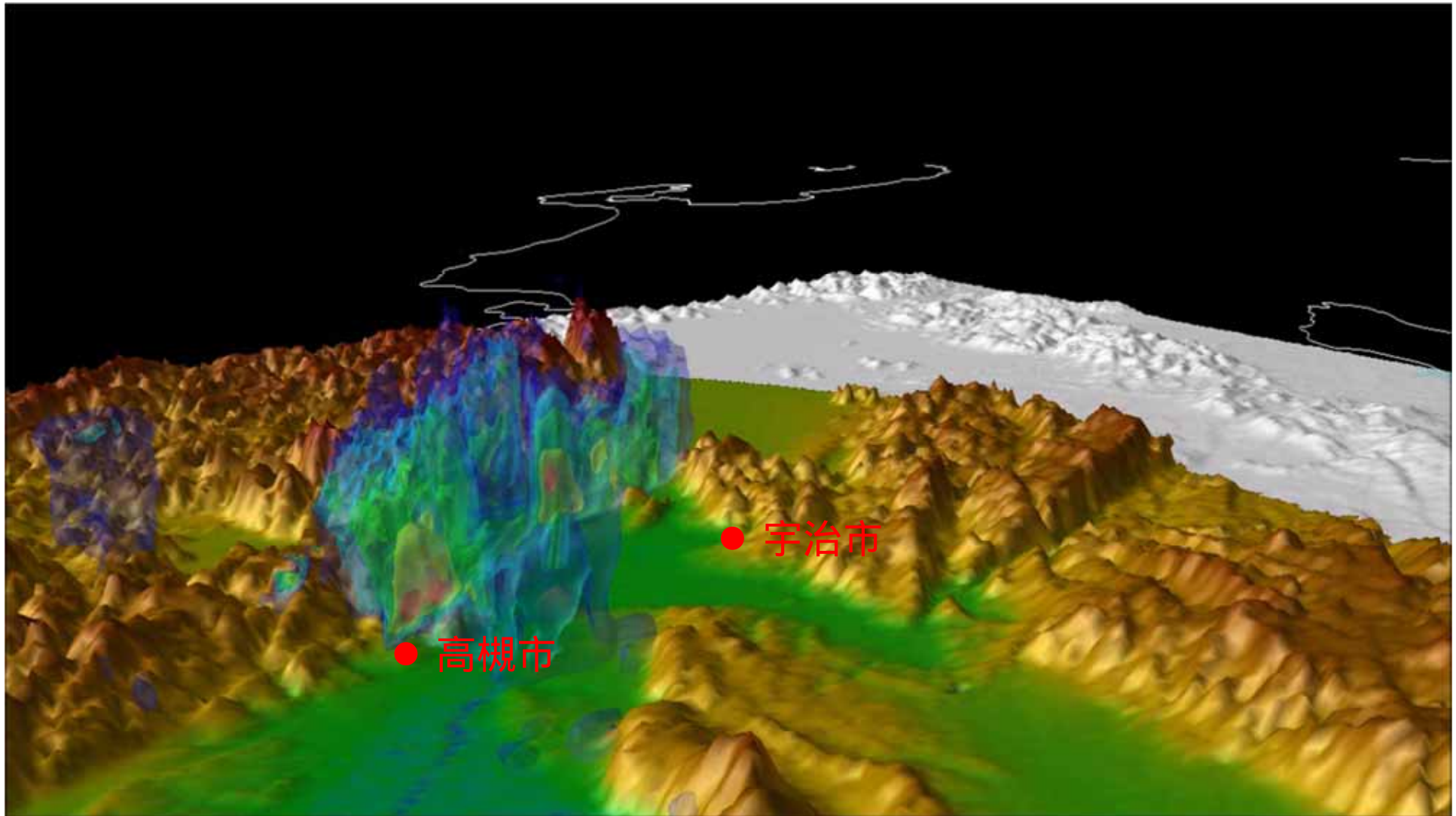
独立行政法人 防災科学技術研究所  
観測・予測研究領域  
水・土砂防災研究ユニット

2012年8月14日0時から8時の積算雨量  
Accumulated rainfall amount [14 AUG 2012, 00:00-7:59JST]



典型的な集中豪雨  
(特定地域に降雨が集中)



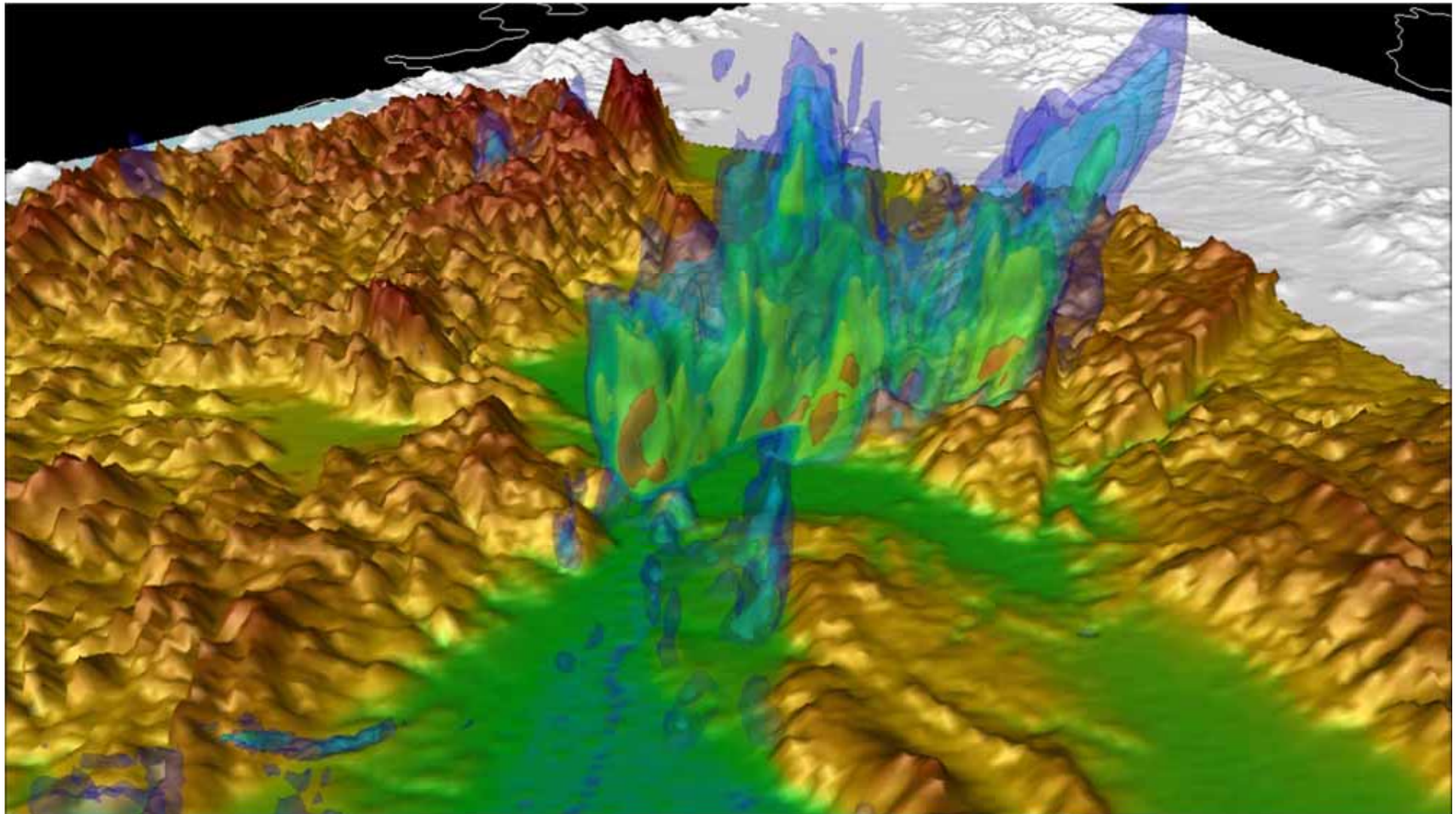


2012年08月14日深夜03時15分から04時15分までの3次元降雨分布.

ほぼ決まった場所で次々と新しい降雨エコーが発生している.

→ 線状降水帯(レインバンド)による集中豪雨

10fps → 300倍速 16



# 京都の大雨 (2013/7/13)

朝日新聞 2013年7月14日 朝刊 33ページ 大阪本社



大雨となり、屋根の下へ逃げる男性＝13日午後、京都市右京区、伊藤進之介撮影

近畿地方で13日午後、大気の状態が不安定になり、京都市などで集中的に激しい雨が降った。14日も近畿北部や中部などで、昼から夕方にかけて雨や雷雨も予想される。

京都府によると、城陽市で1時間の雨量が68ミに達した。宇治市では1棟が床上浸水し、同市と城陽市で計22棟が床下浸水。3市2町1村で計5802軒が停電した。京都市では落雷の影響で、JR山陰線のダイヤが乱れた。13日午後2時ごろ、同市の嵯峨嵐山駅の信号機が故障。嵯峨嵐山―亀岡間で運転が見合わせられ、上下25本が運休した。

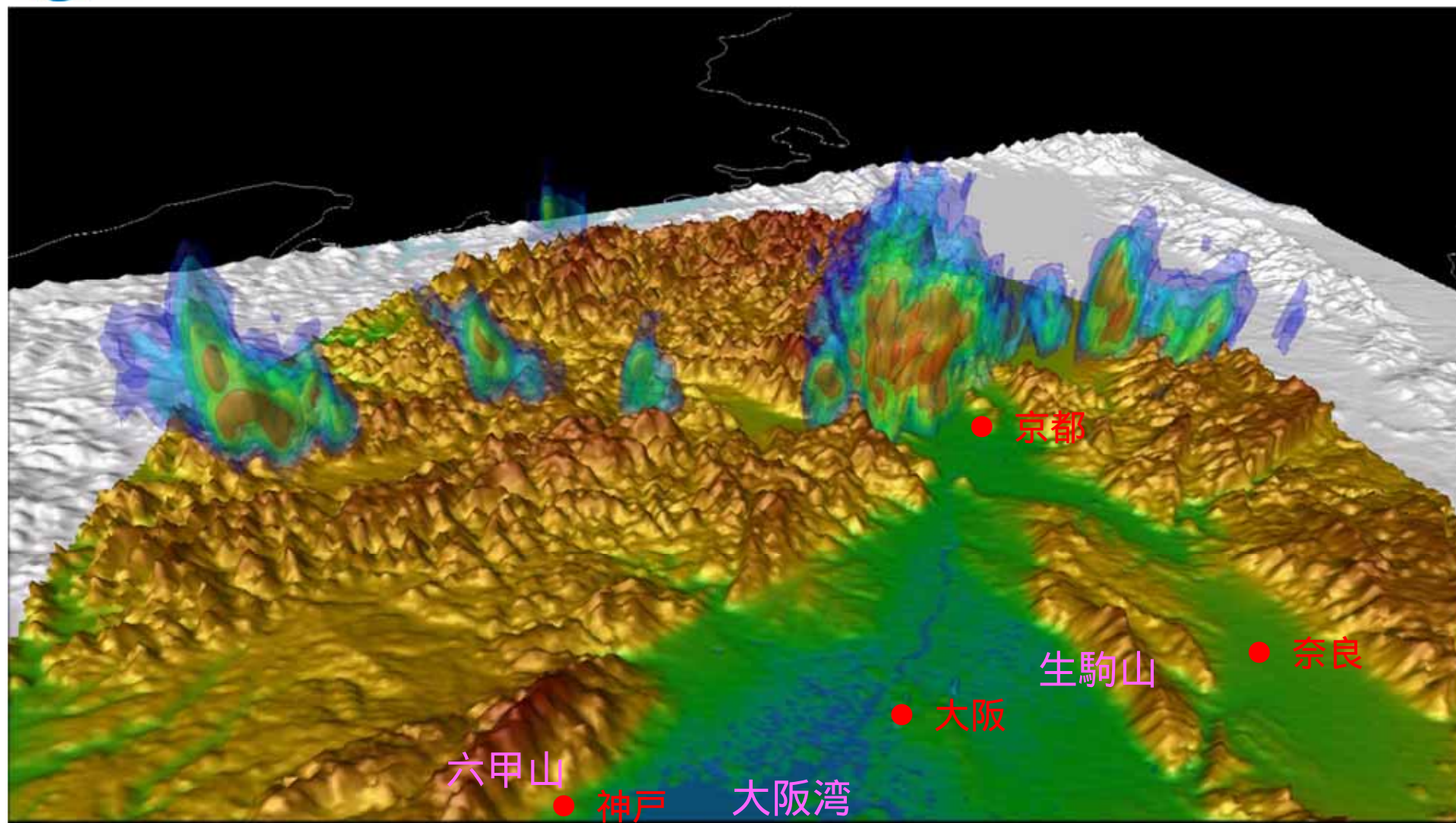
## 京都で大雨 5800軒が停電

京都府災害警戒本部  
7月13日21時40分現在

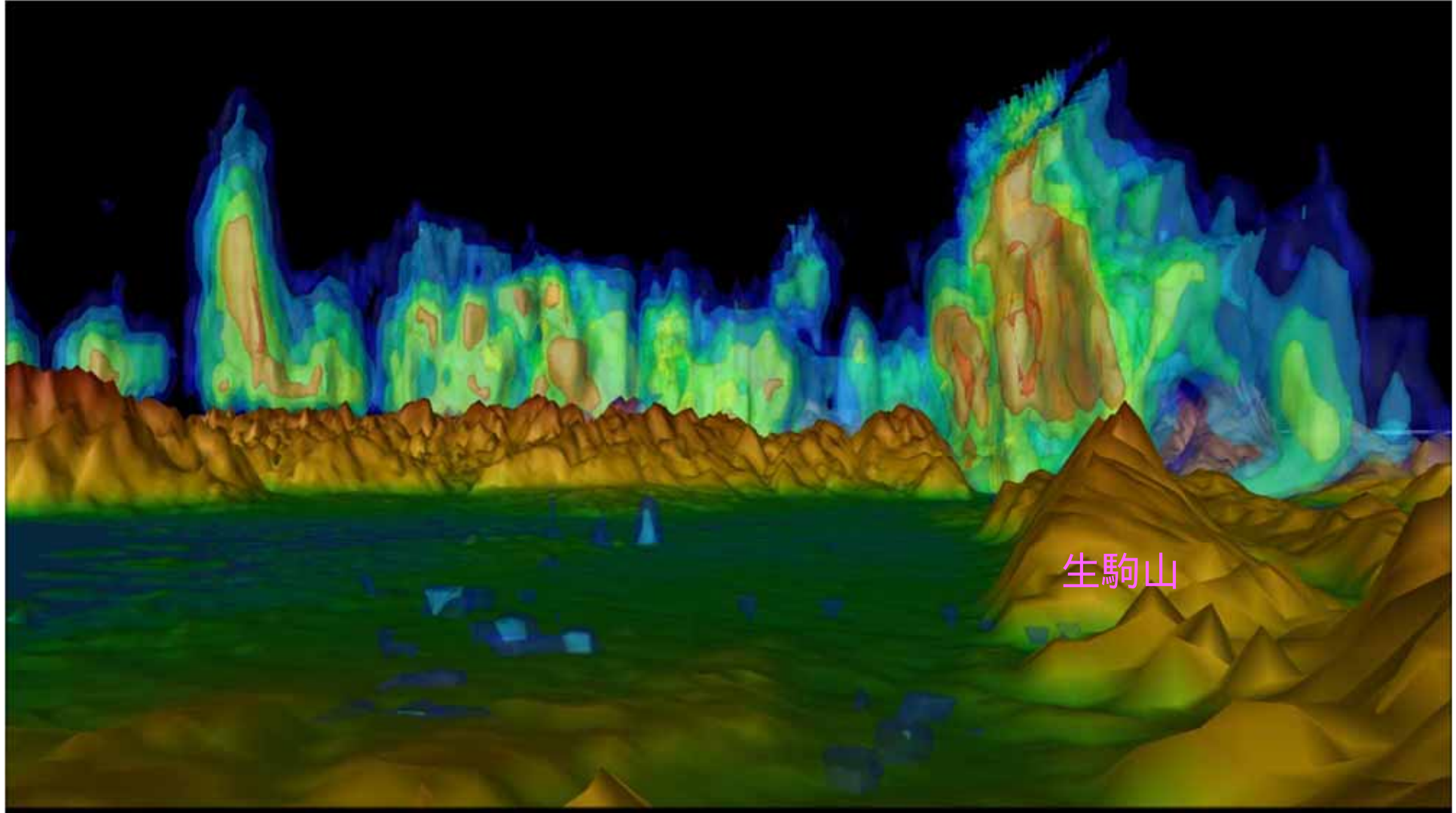
### 7月13日の大雨の被害状況等

|      |      |     |     |
|------|------|-----|-----|
| 人的被害 | なし   |     |     |
| 住家被害 | 床上浸水 | 宇治市 | 1軒  |
|      | 床下浸水 | 宇治市 | 4軒  |
|      |      | 城陽市 | 18軒 |

| 時間雨量測定箇所       | 時間雨量   |
|----------------|--------|
| 寺田 (城陽)        | 6.8 mm |
| 京田辺 (気) (京田辺市) | 5.4 mm |
| 田辺 (京田辺市)      | 5.0 mm |
| 荒木 (宇治田原町)     | 4.5 mm |
| 八幡 (八幡市)       | 3.9 mm |
| 宇治 (宇治市)       | 3.5 mm |
| 佐古 (久御山町)      | 3.1 mm |
| 宮村 (宇治田原町)     | 2.6 mm |
| 松田橋 (大山崎町)     | 2.3 mm |
| 西笠取 (宇治市)      | 2.0 mm |



2013年07月13日14時から16時20分までの30秒毎の3次元降雨分布を大阪湾上空から眺める(観測範囲半径60km, 格子間隔 250m)。



2013年07月13日15時20分から16時20分までの30秒毎の3次元降雨分布を大阪平野南部から眺める．地形(SRTM-DEM)の高さはエコーの高さに対して約2倍拡大している．

10fps → 300倍速 20

# 丹波市豪雨災害

気象庁発表「前線による大雨 平成26年8月15日～8月20日(速報)」より抜粋

8月15日から20日にかけて、本州付近に停滞した前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で西日本の広い範囲で大気の状態が非常に不安定となり局地的に雷を伴って非常に激しい雨が降った。15日から18日までに観測された最大48時間降水量が、京都府福知山市福知山で341.0ミリ、＜中略＞、兵庫県丹波市柏原で 278.5 ミリとなり、それぞれ観測史上1位の値を更新した。また、19日から20日にかけては、広島県広島市三入において最大 1 時間降水量が101.0ミリ、最大 3 時間降水量が217.5ミリ、最大24時間降水量が257.0ミリとなり、いずれも観測史上 1 位の値を更新した。

この大雨により、土砂災害、浸水害、河川の氾濫等が発生し、15 日から18日にかけては石川県、京都府及び兵庫県で合わせて死者 4 名となった。19 日から 20 日にかけては、広島県広島市で発生した土砂災害により、死者 34 名、行方不明 31 名の人的被害となった。また、京都府や兵庫県、岐阜県、広島県を中心に住家被害や農業被害が生じた。



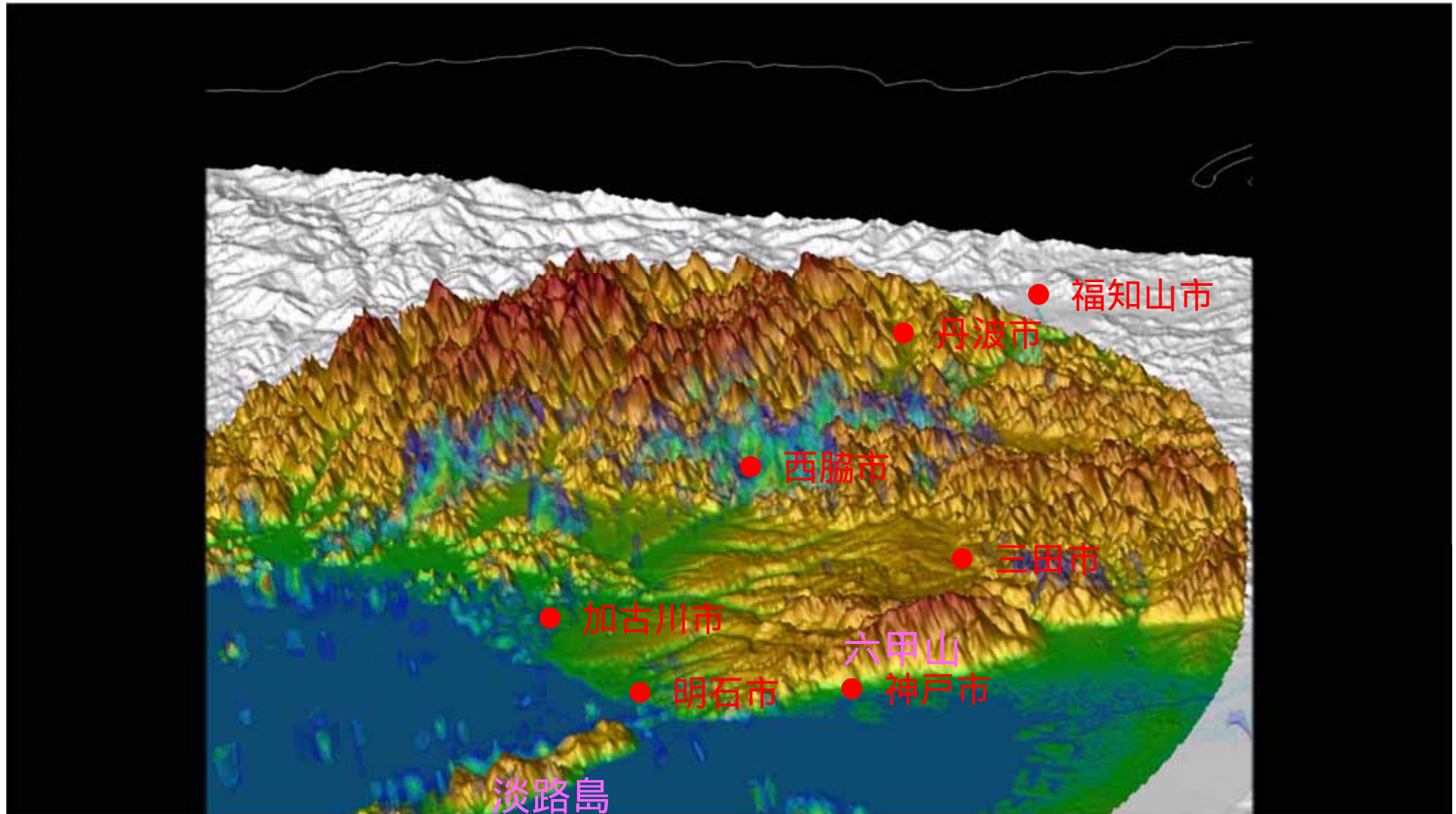
丹波市市島町徳尾(17日5:26)



由良川の氾濫で福知山市内が冠水



JR福知山線復旧作業(18日)



NICT未来ICT研究所(神戸市岩岡町)設置のフェーズドアレイ気象レーダで観測された2014年08月16日夜9時から翌日朝5時までの8時間の3次元降雨分布(観測範囲半径60km, 格子間隔 250m) . 10fps → 300倍速 22

## 突発的豪雨の早期検知のための 新しい観測システム

突発的局所的気象災害の早期検出と予測のためには、

降雨発生前の環境場・降雨域周辺の観測データ  
風速場、水蒸気、エアロゾル

高時間・空間分解能のネットワーク降雨観測  
降雨減衰補正、デュアルドップラー観測

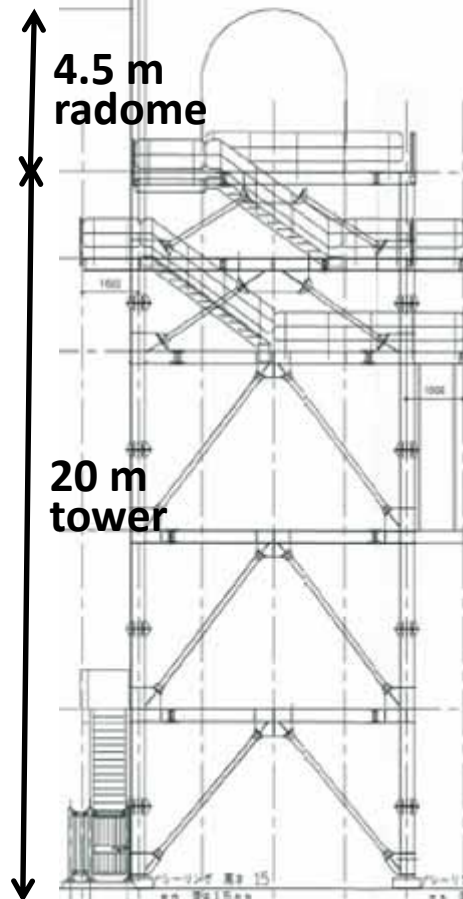


レーダ・ドップラーライダー等の融合観測  
によるゲリラ豪雨の前兆現象の検知



# PANDA: Phased Array weather radar and Doppler Lidar Network fusion Data system

@NICT未来ICT研究所  
(神戸市西区岩岡町)  
@NICT沖縄電磁波技術  
センター(恩納村)



Kobe



Okinawa



# PANDA センサ融合データシステム



ドップラーライダー



マイクロ波放射計



スカイラジオメータ



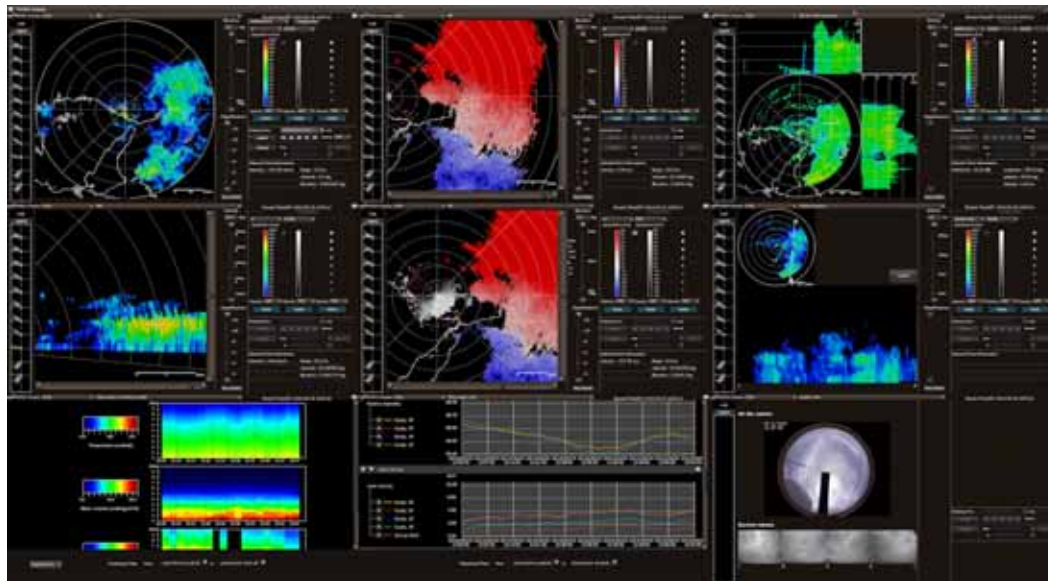
超音波風速計  
温湿度計



雲監視カメラ



全天カメラ

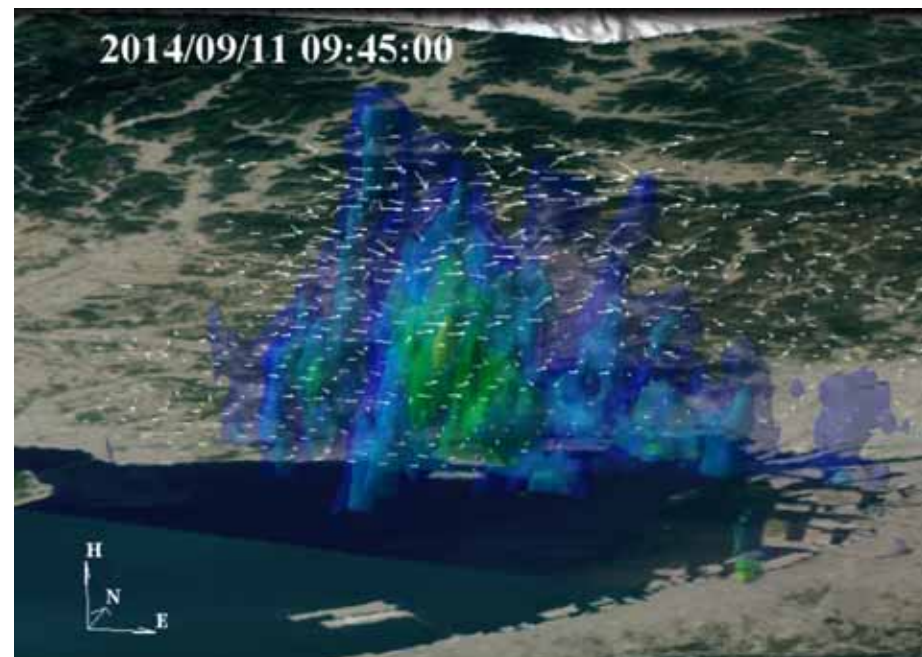
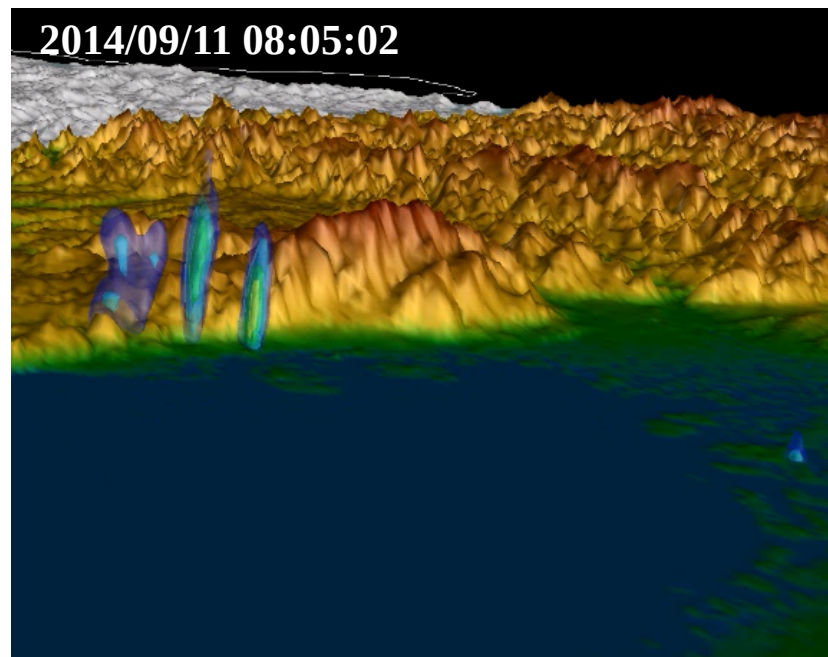
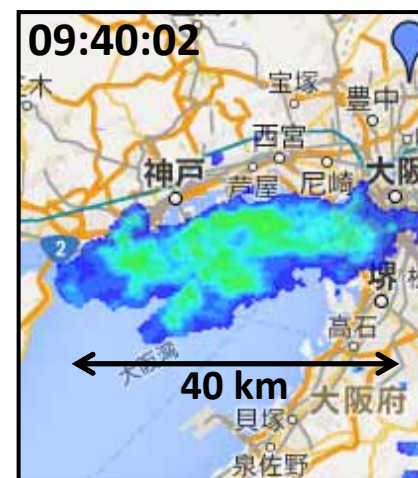


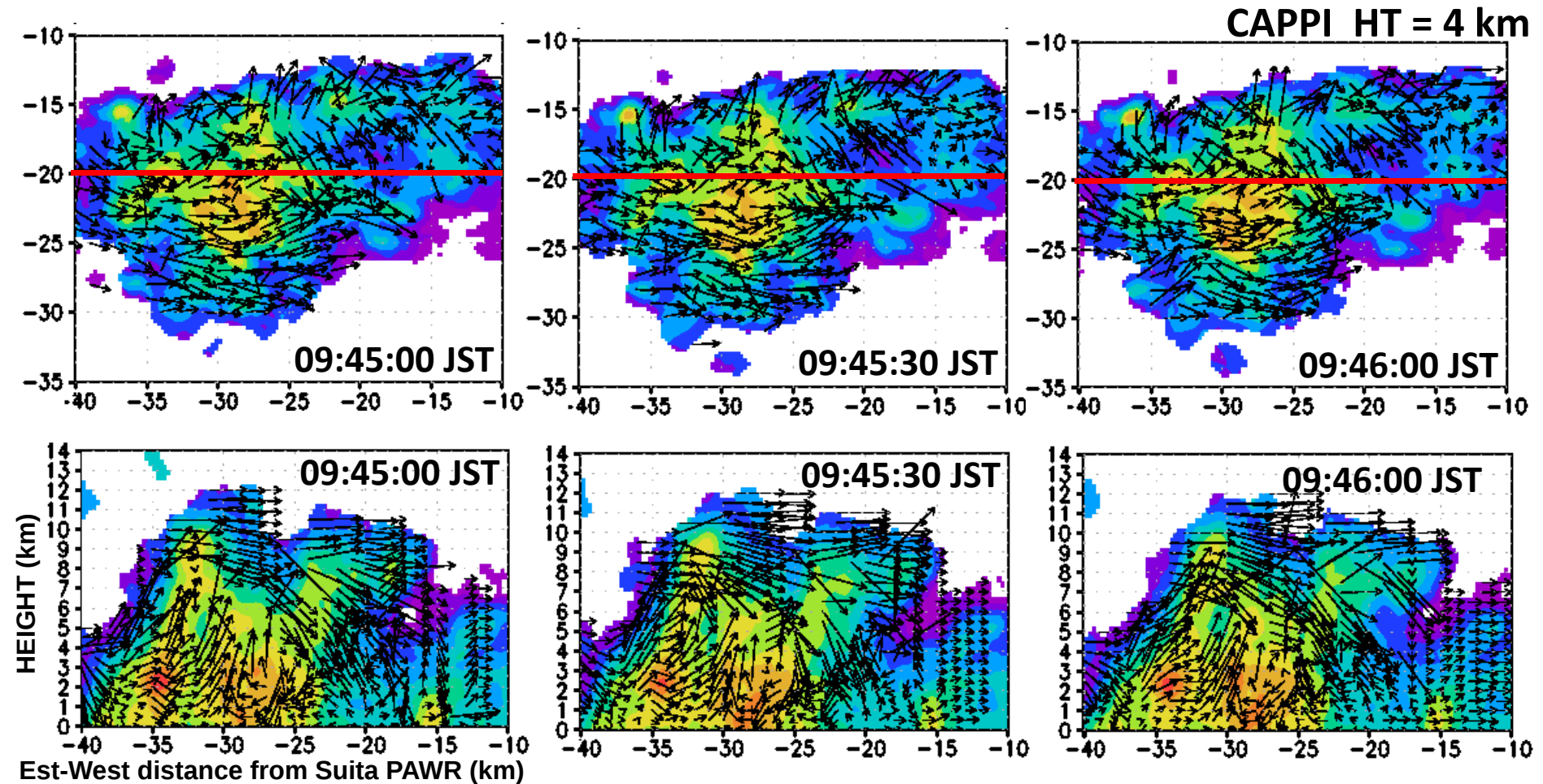
← 融合システムのデータ可視化  
(4K-REGZAによる9面表示)  
@NICT小金井本部

# 神戸・吹田PAWRの観測範囲



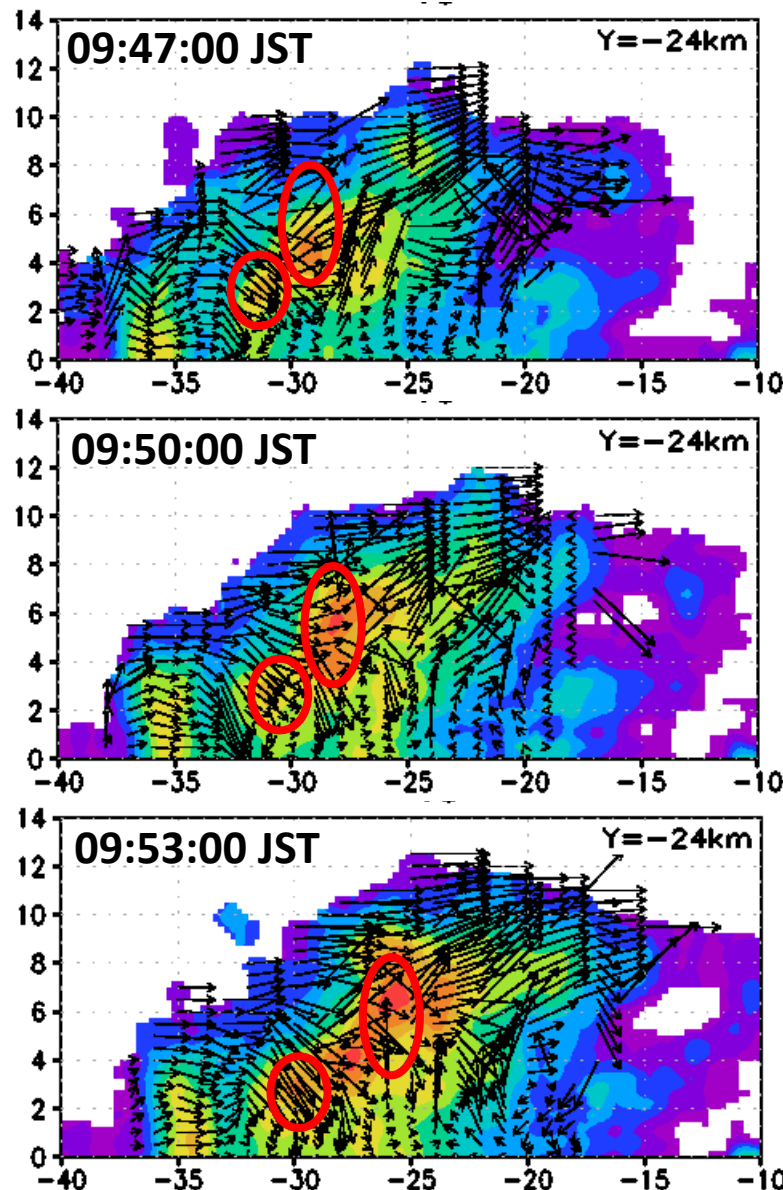
# 発達する対流雲 (08:00 ~ 10:00, Sep 11, 2014)





- 30秒毎に見ると、水平風速ベクトル( $u+v$ )も鉛直風速分布( $u+w$ )もほとんど変化しないが、3分後の鉛直断面を見ると降水コアは確かに成長している(@ $X=-30\text{km}$ 付近)
- データ品質管理を行っていないため(特に神戸PAWR)ノイズデータが多い

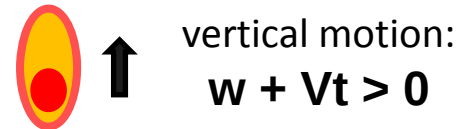
# 降水の成長とエコーの3次元移動ベクトル



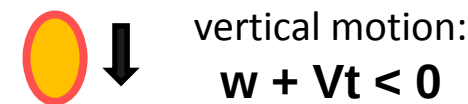
- 1) 水平・鉛直風速  $u, v, w$  ← dual-Doppler解析
- 2) 雨滴の終端落下速度  $V_t$  ← 反射強度( $Z_e$ )から推定
- 3) 降水エコーの3次元移動ベクトル ← 30秒毎データから  
TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation)法で計算
- 4) 降水強度の盛衰量 ← 移動ベクトル or dual-Doppler風速

鉛直方向のエコーの動きを考えると、

強い上昇流 ( $> 6 \text{ m/s}$ )中では移動ベクトルは上向き

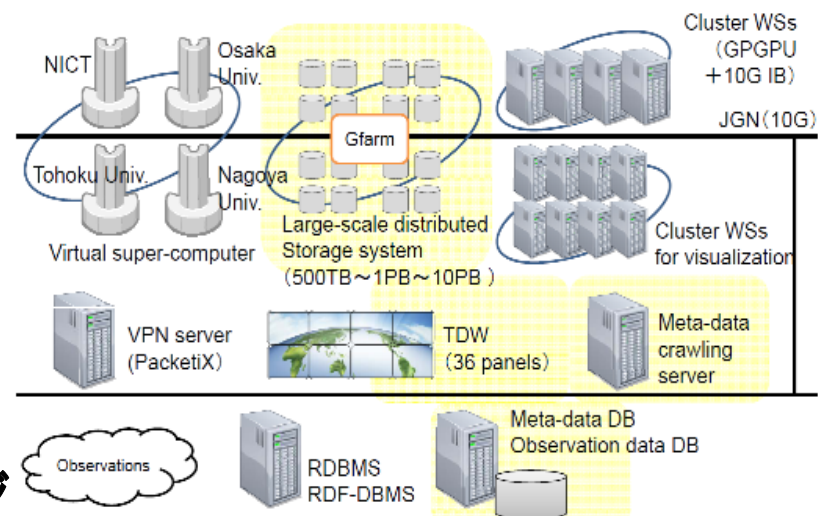
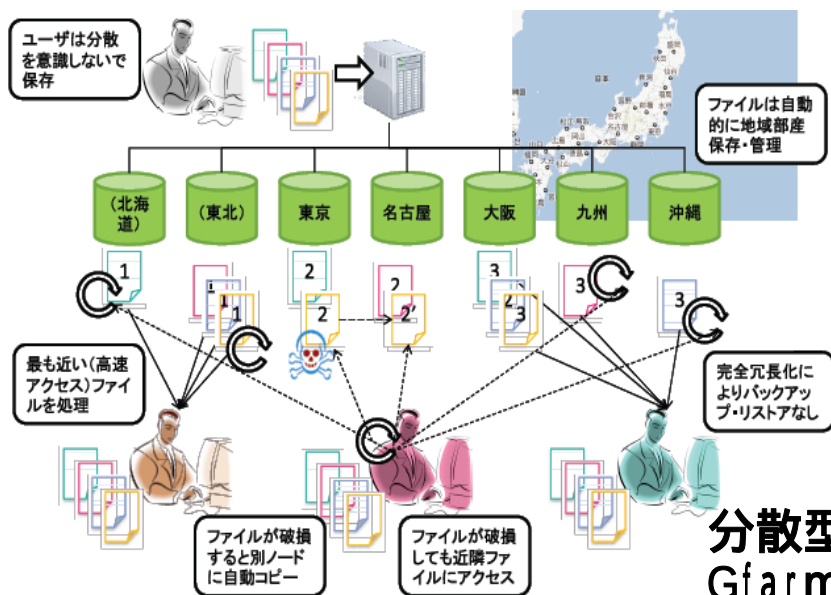
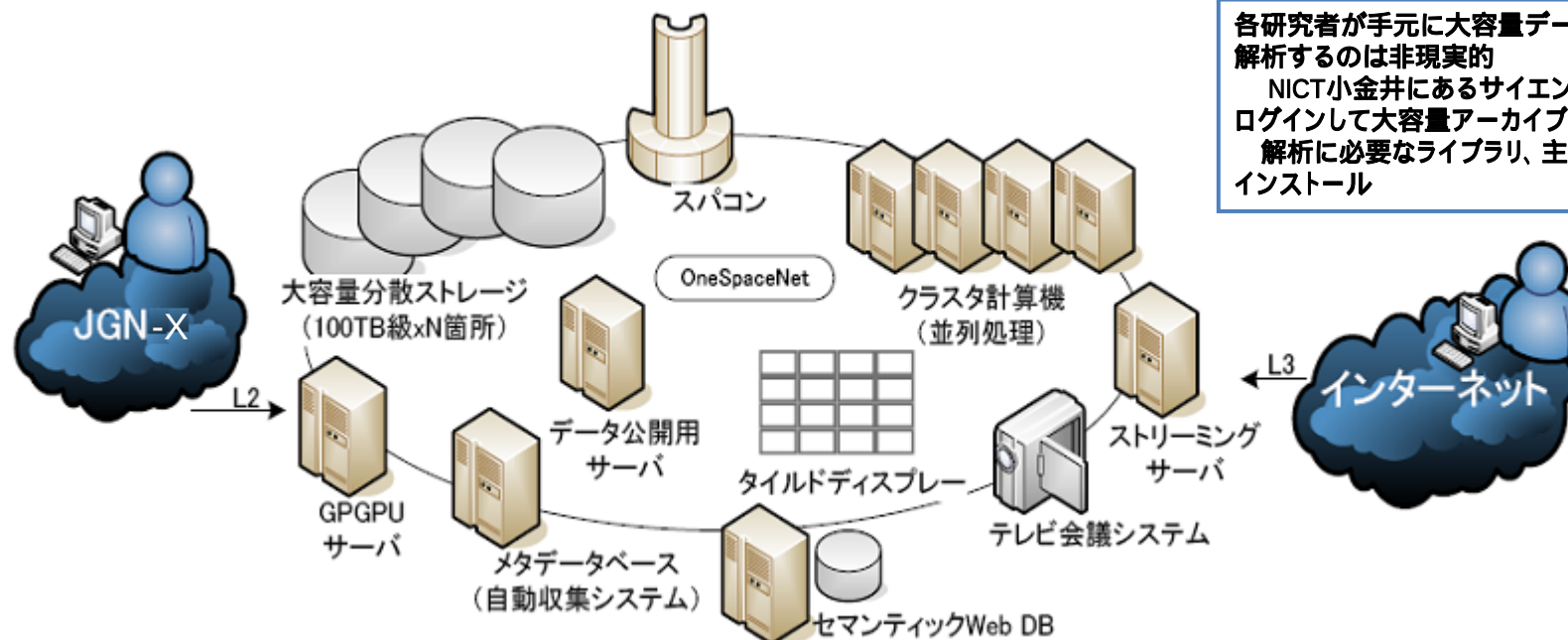


下降流や弱い上昇流中では移動ベクトルは下向き

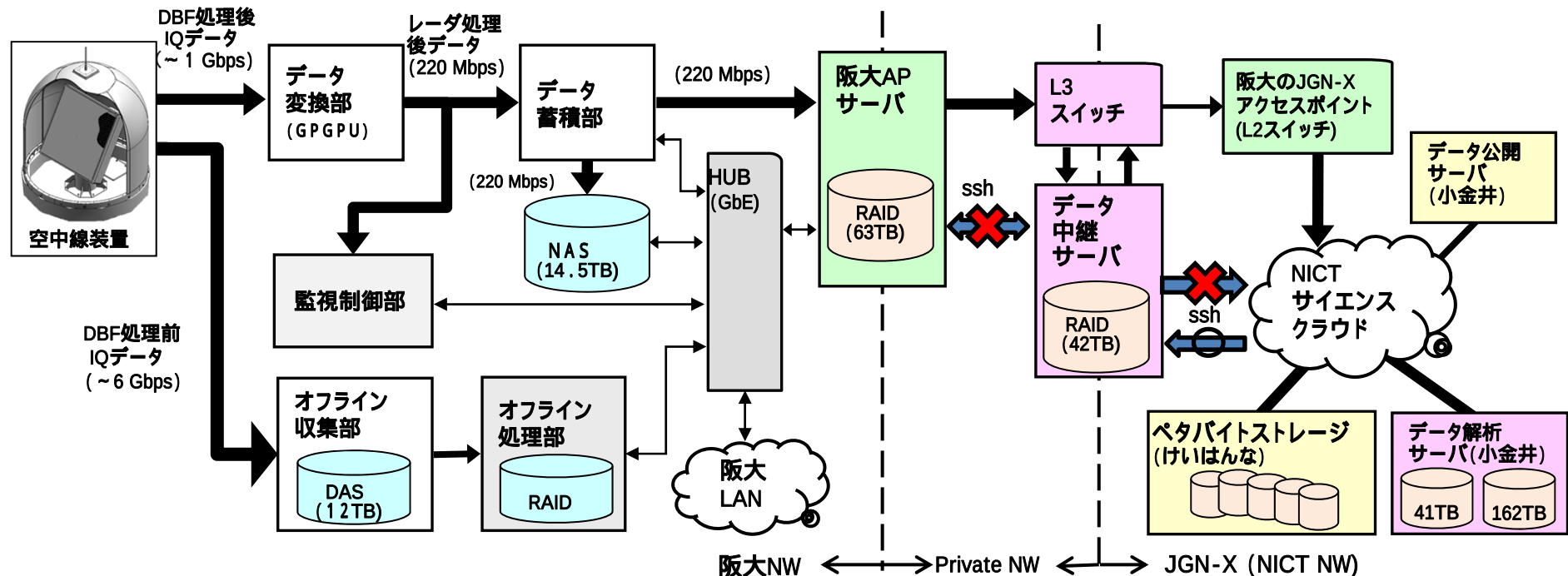


しかし、これに降水の盛衰を加えて考える必要がある。移動ベクトルが上向きでも下向きでも、衝突併合によって降水は成長するが、成長率は雲水量に比例するので上昇流中の方が有利と考えられる。 詳細な解析は今後の研究課題

# NICTサイエンスクラウド



# 阪大PAWR観測データシステム



## ●リアルタイム処理

実利用には必須、現場計算機でQL画像を作成、現状は観測終了後1分後(神戸・沖縄は3~5分後)にWeb画面更新

## ●過去データの利用

Webページから過去データに容易にアクセス  
研究目的には非常に重要、防災対策としても利用価値大

## ●ビッグデータ

データ容量~1.4 TB/日(1台PAWR)、原則24時間運用、  
NICTサイエンスクラウド(ペタバイトストレージ@けいはんな)  
M2Mデータセンター@けいはんな(2.4PBを確保)  
無降雨時のデータはZe、Vrを残して削除



# 公開Webページ (<http://pawr.nict.go.jp/>)

→ pawr.nict.go.jp

[Google Maps表示](#) [海岸線表示](#) [画像一覧表示](#)

2014/04/18

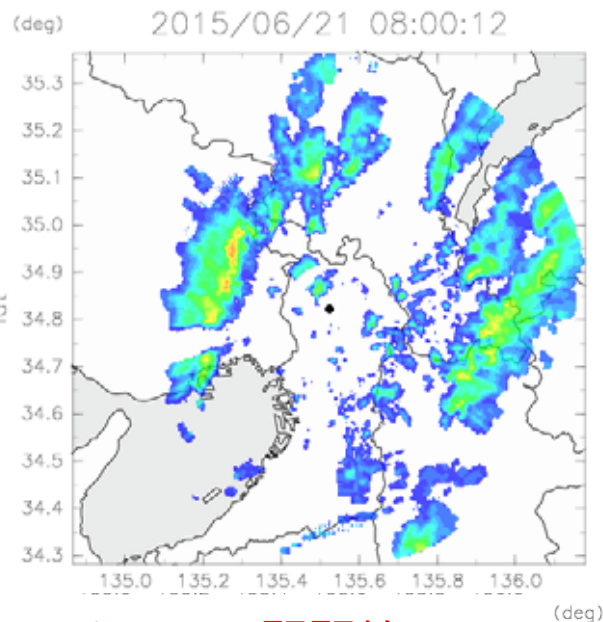


[トップページ](#) | [直近のデータ](#) | [過去のデータ](#) | [PAWRについて](#) | [トピックス](#) | [リンク](#)

## 最新の降雨分布

このページは30秒ごとに自動更新されます。

ALT(km) 2.0



日付を指定

2013 年 5月

日 月 火 水 木 金 土

|    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 2  | 3  | 4  |    |    |    |
| 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |    |

降雨量から指定

2014 年 03 月 表示

過去データの  
利用

神戸・沖縄PAWRもWeb公開開始

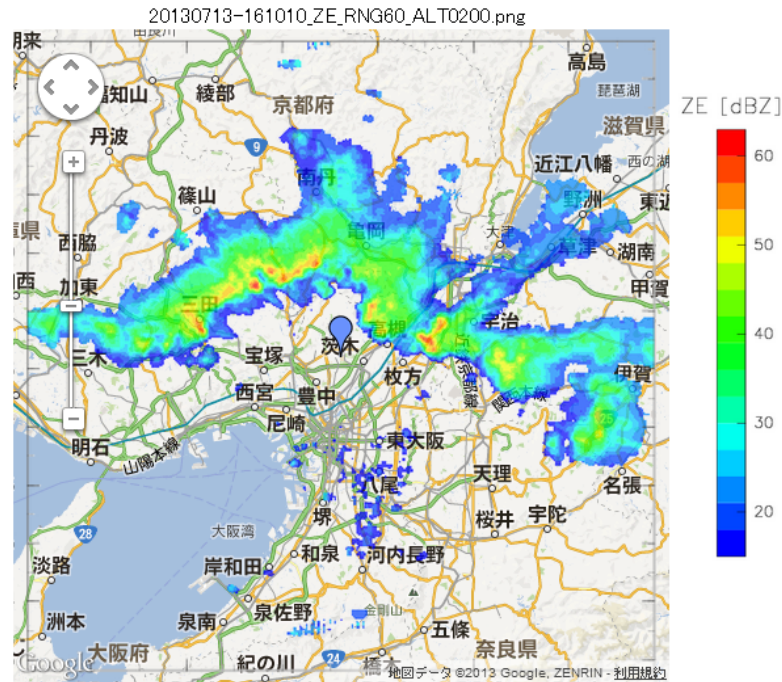
<http://pawr.nict.go.jp/pawr/kobe/web/>

<http://pawr.nict.go.jp/pawr/okinawa/web/>

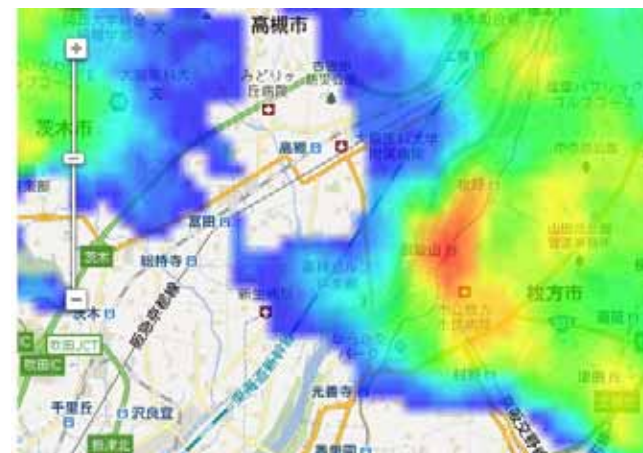
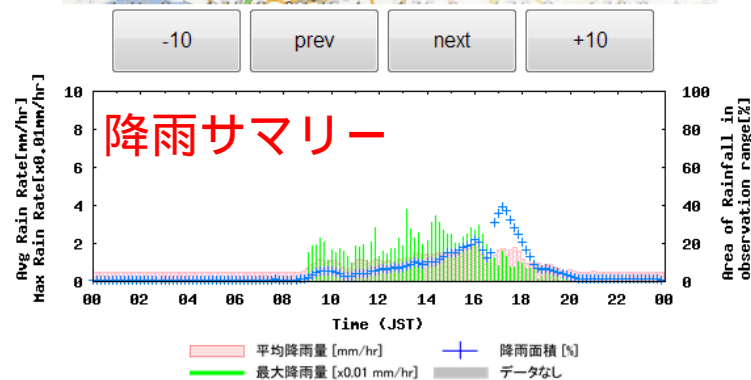
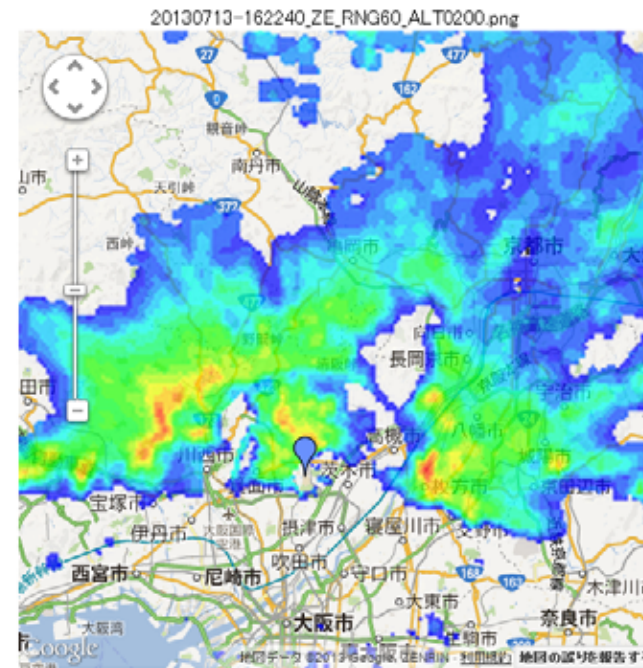


# 降雨サマリーとグーグルマップス表示

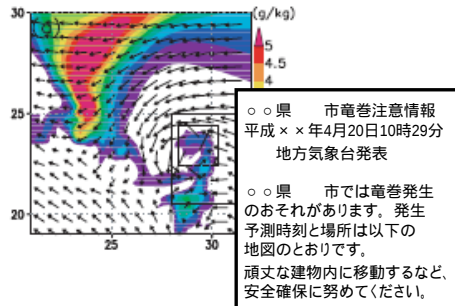
2013/07/13  
16:10:10



2013/07/13  
16:22:40



# フェーズドアレイ気象レーダの応用分野



数値予報モデルへのデータ同化、  
きめ細かな竜巻注意情報  
【気象庁】



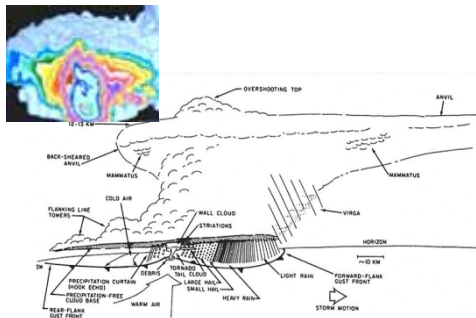
洪水予測、土砂災害予測  
【国土交通省・地方整備局】



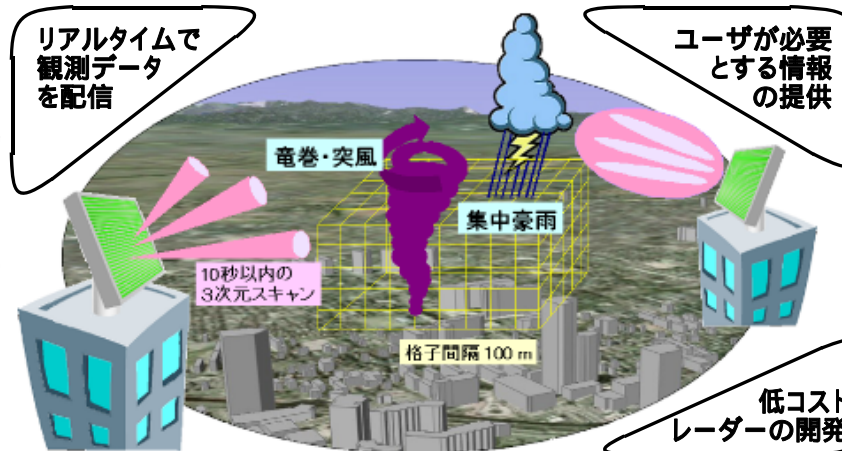
ダム放流(洪水調整)  
【ダム管理事務所】



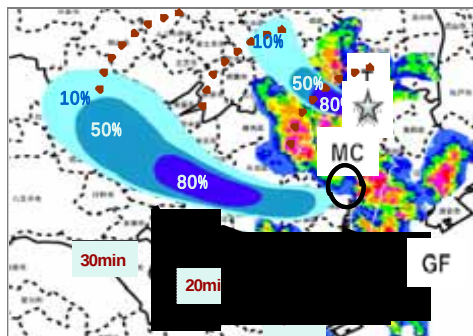
航空管制【航空局】



突発的・局所的現象の解明  
【研究機関・大学】



住民避難勧告【市町村】

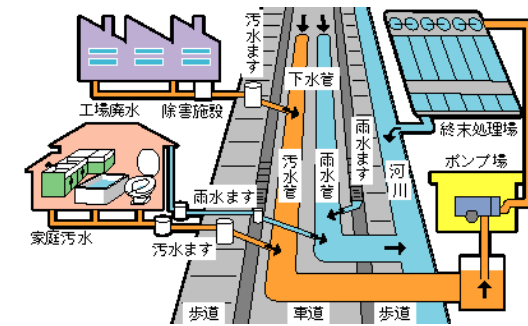


一般市民への情報提供  
【民間気象会社】

次世代ドップラーレーダー技術の研究開発  
【総務省・NICT】



列車安全運行【鉄道会社】



下水道ポンプ制御【市町村】

- フェーズドアレイ気象レーダ(PAWR)は、30秒で半径60kmの範囲を距離分解能100m、100仰角という3次元詳細観測を実現し、ゲリラ豪雨のタマゴを降り始めの10分前に探知。
- 宇治豪雨(2012年8月14日)、京都大雨(2013年7月13日)、丹波市豪雨(2014年8月17日)の3次元降雨構造をアニメーションで紹介し、集中豪雨のメカニズムを考察。
- 突発的豪雨の早期検出のためのPAWR・ドップラーライダー融合システム(PANDA)を神戸・沖縄に設置。
- 神戸と吹田PAWRによる30秒毎のdual-Doppler観測による3次元風速分布による降水の成長に関する新しい研究。
- ビッグデータをリアルタイム処理するとともに過去データをアーカイブするデータシステムとWeb公開ページを紹介。