

2021年度日本写真測量学会関西支部
特別講演会
2021年6月25日@オンライン

豪雨の予兆を 捉える

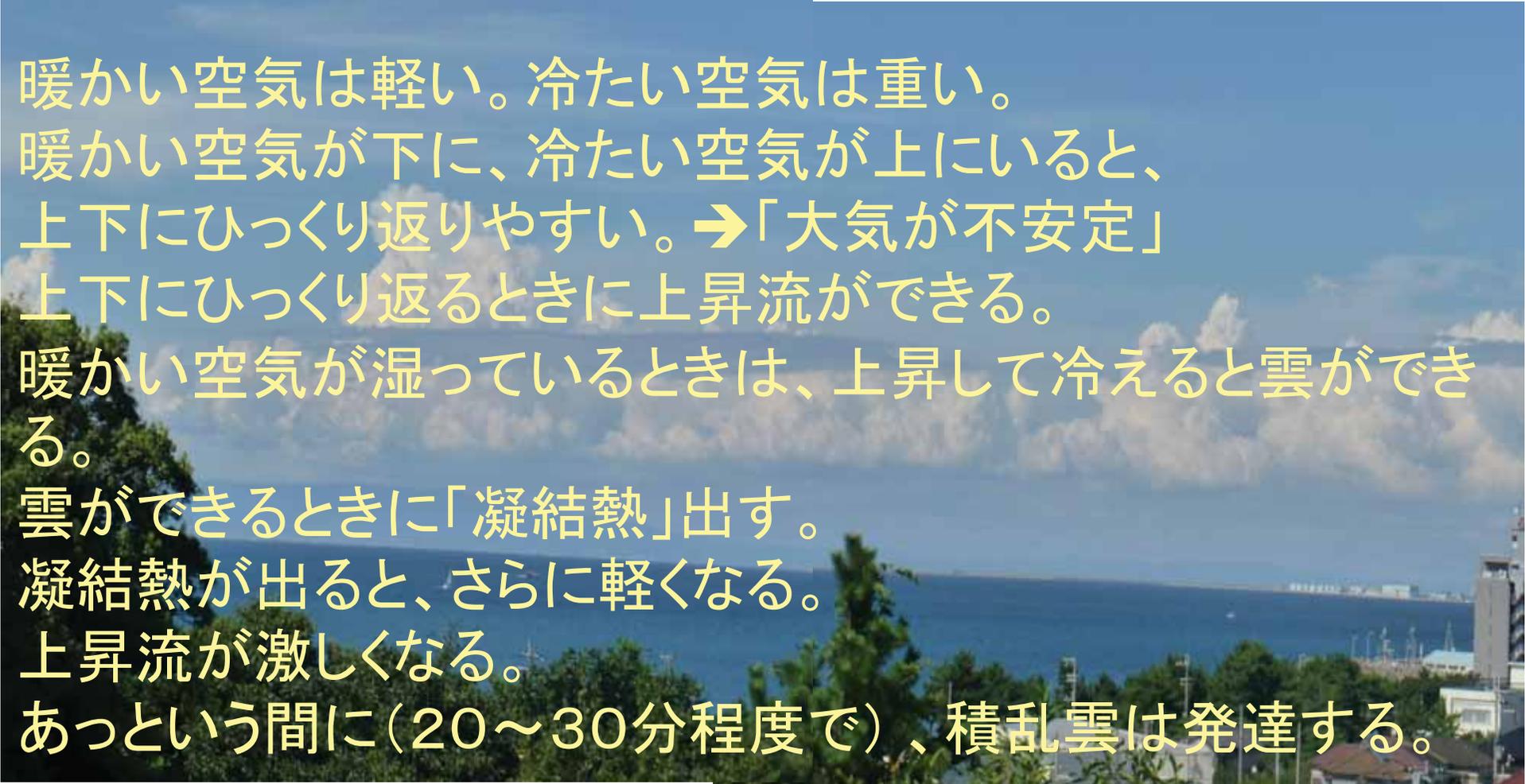
－豪雨のタマゴとタネ－

京都大学防災研究所
山口弘誠



撮影：増田有俊氏

全ての豪雨は積乱雲（入道雲）がもたらす



暖かい空気は軽い。冷たい空気は重い。
暖かい空気が下に、冷たい空気が上にいると、
上下にひっくり返りやすい。→「大気が不安定」
上下にひっくり返るときに上昇流ができる。
暖かい空気が湿っているときは、上昇して冷えると雲ができる。
雲ができるときに「凝結熱」出す。
凝結熱が出ると、さらに軽くなる。
上昇流が激しくなる。
あっという間に（20～30分程度で）、積乱雲は発達する。

目的：集中豪雨・ゲリラ豪雨とその災害予測を実現する！

都市化や温暖化で増加すると推測

2008年7月28日（神戸、都賀川）

ゲリラ豪雨（10km・1時間）

14:22



14:28



14:36



14:46



2014年8月20日（広島）

線状対流系・集中豪雨（100km・半日）



笑顔が、突然、悲惨な顔になる災害

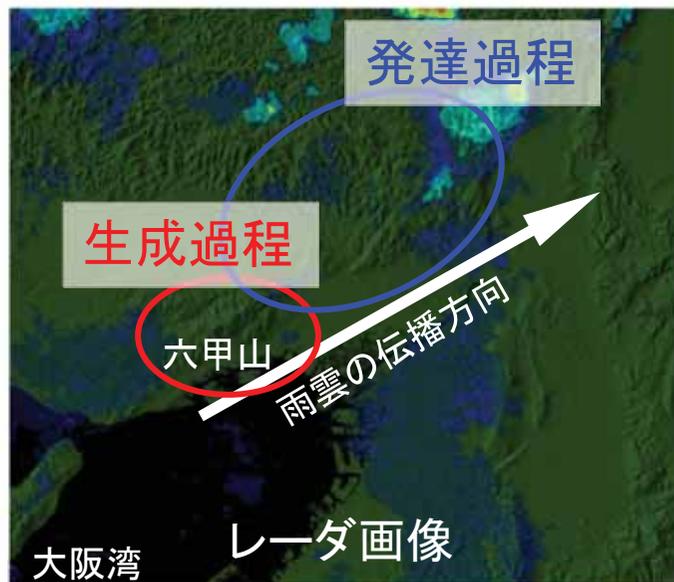
突然の発生が予測できない現実

わずか数分でも早い情報

たとえ1人・2人でも、命を守りたい！

**集中豪雨・ゲリラ豪雨の
予知・予測は最先端課題**

ストームジェネシス(生成過程) の解明へ



5分毎、計3時間の動画

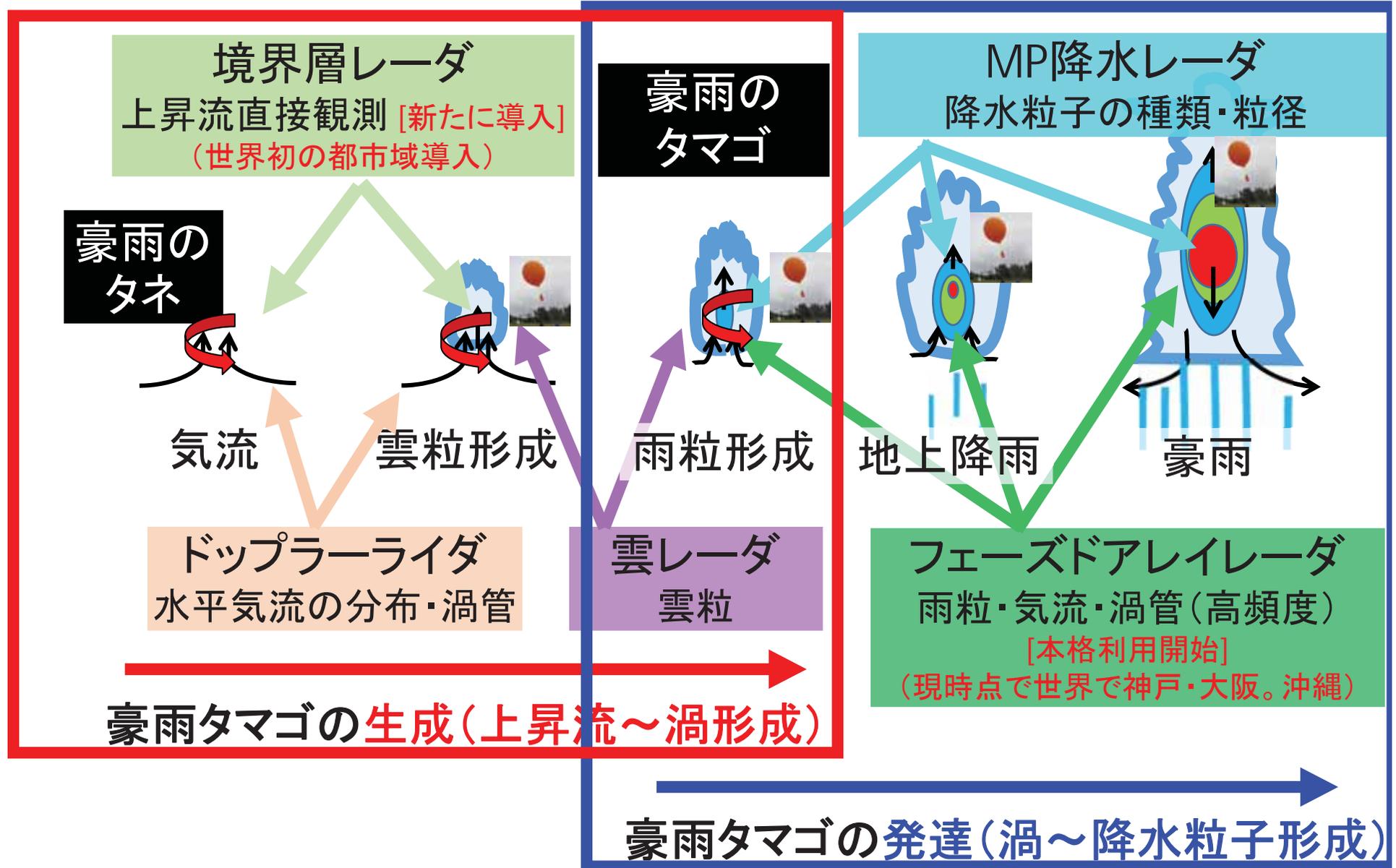


降水レーダ画像で見えない生成過程が不明

これまでの研究は、**発達過程**をメインとしてきた。

- **発達過程**に関しては、精緻化・高解像度化へ。
- **加えて、生成過程**の解明・モデル化にも挑戦して、より早い予測、情報提供ができるようにしたい。

豪雨の生成と発達を捉える観測



1. 発達に関する近年の研究

- ✓ 気象レーダー観測による危険な豪雨のタマゴの探知
- ✓ 雲物理過程の理解の進化とモデル同化予測
- ✓ アンサンブル予測

2. 生成に関する近年の研究

- ✓ 時代は、降水だけでなく、降水・雲・水蒸気のステージへ
- ✓ マルチセンサーを用いた観測
- ✓ 都市の熱効果・形状効果を考慮できる数値モデルの開発

3. 気候変動下における豪雨の将来変化

- ✓ 梅雨豪雨の将来変化

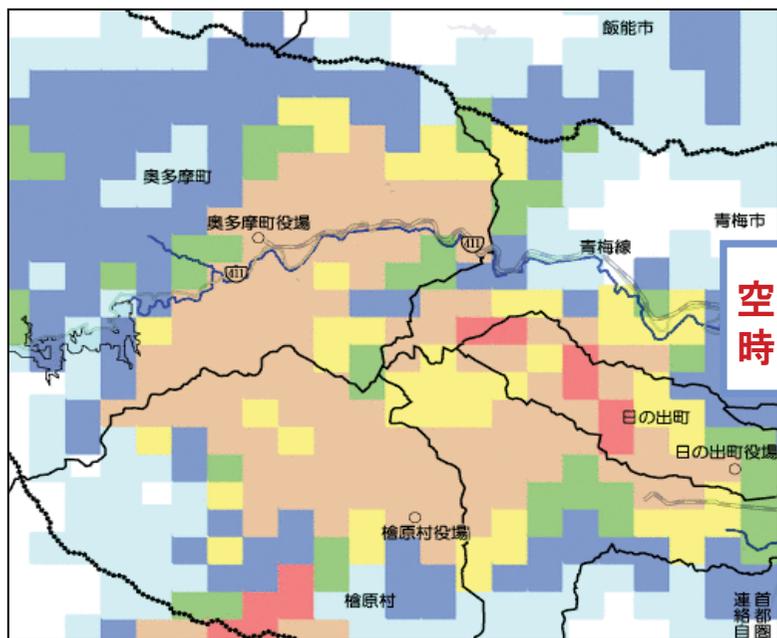


- ✓ 降雨開始からわずか10分で急激な水位上昇
- ✓ たった一つの積乱雲によってもたらされた鉄砲水
- ✓ “分”単位の時間の重要性を愕然と認識

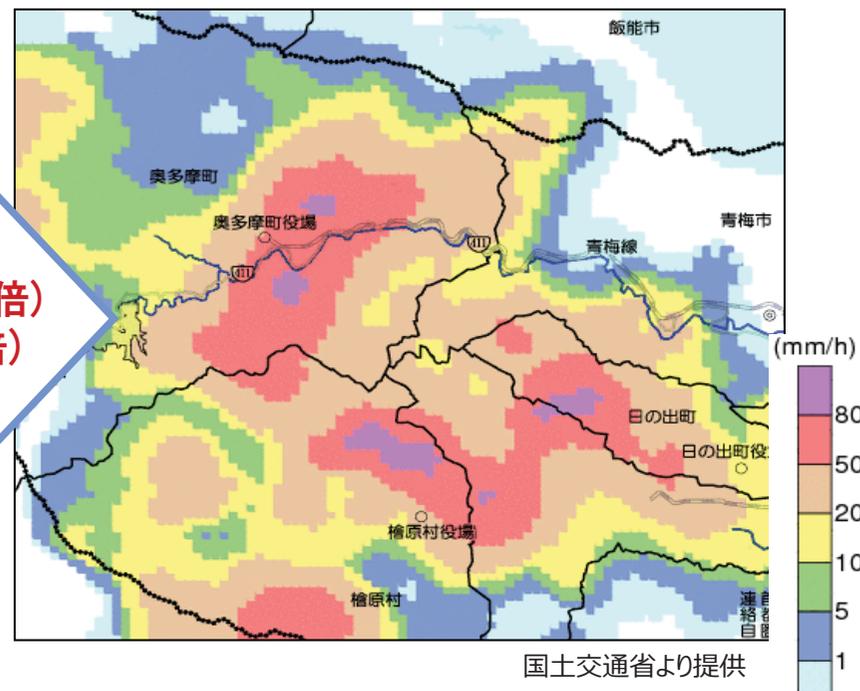
XRAIN(エックスレイン) 2010年より導入 : 国土交通省の最新レーダーネットワーク

在来型非偏波Cバンドレーダ雨量
(空間分解能: 1km, 更新間隔: 5分, 配信までの遅れ時間: 5~6分, 地上雨量による補正: あり)

XバンドMPレーダ雨量
(空間分解能: 250m, 更新間隔: 1分, 配信までの遅れ時間: 1分, 地上雨量による補正: なし)



空間分解能(16倍)
時間分解能(5倍)

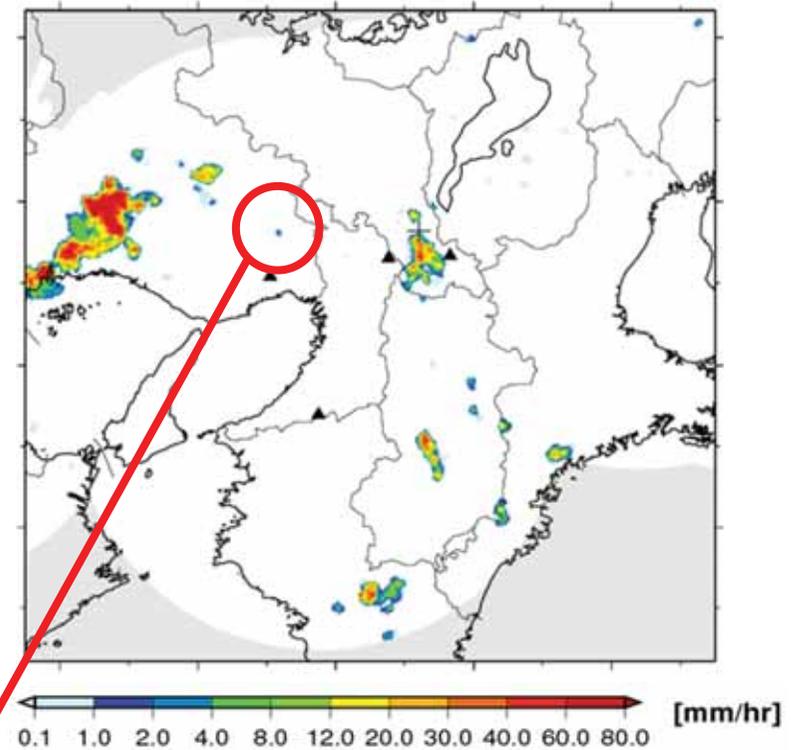
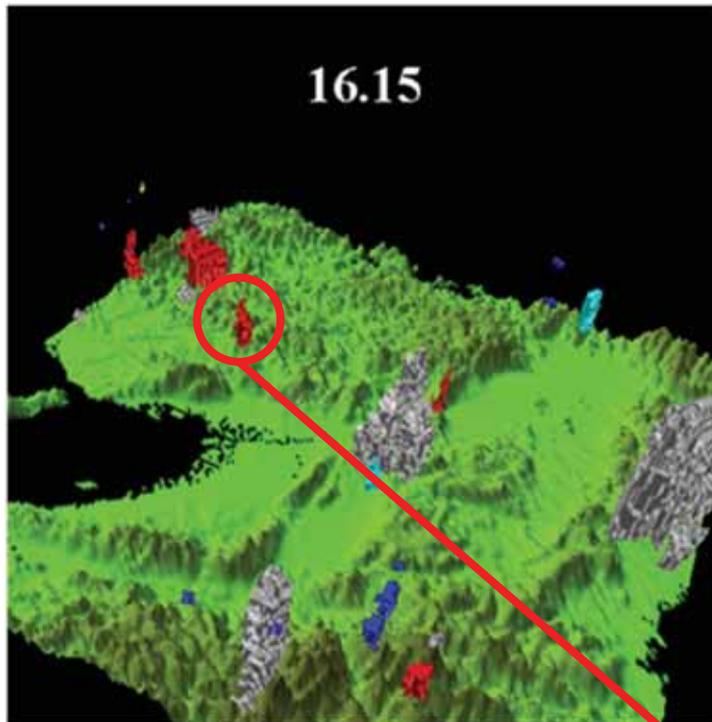


時間・空間分解能の向上と、降雨観測精度の向上

XRAINは3次元的な気流観測が可能

渦度を用いた発達する雨雲判定
(赤色が危険な雨雲)

地上の降雨強度

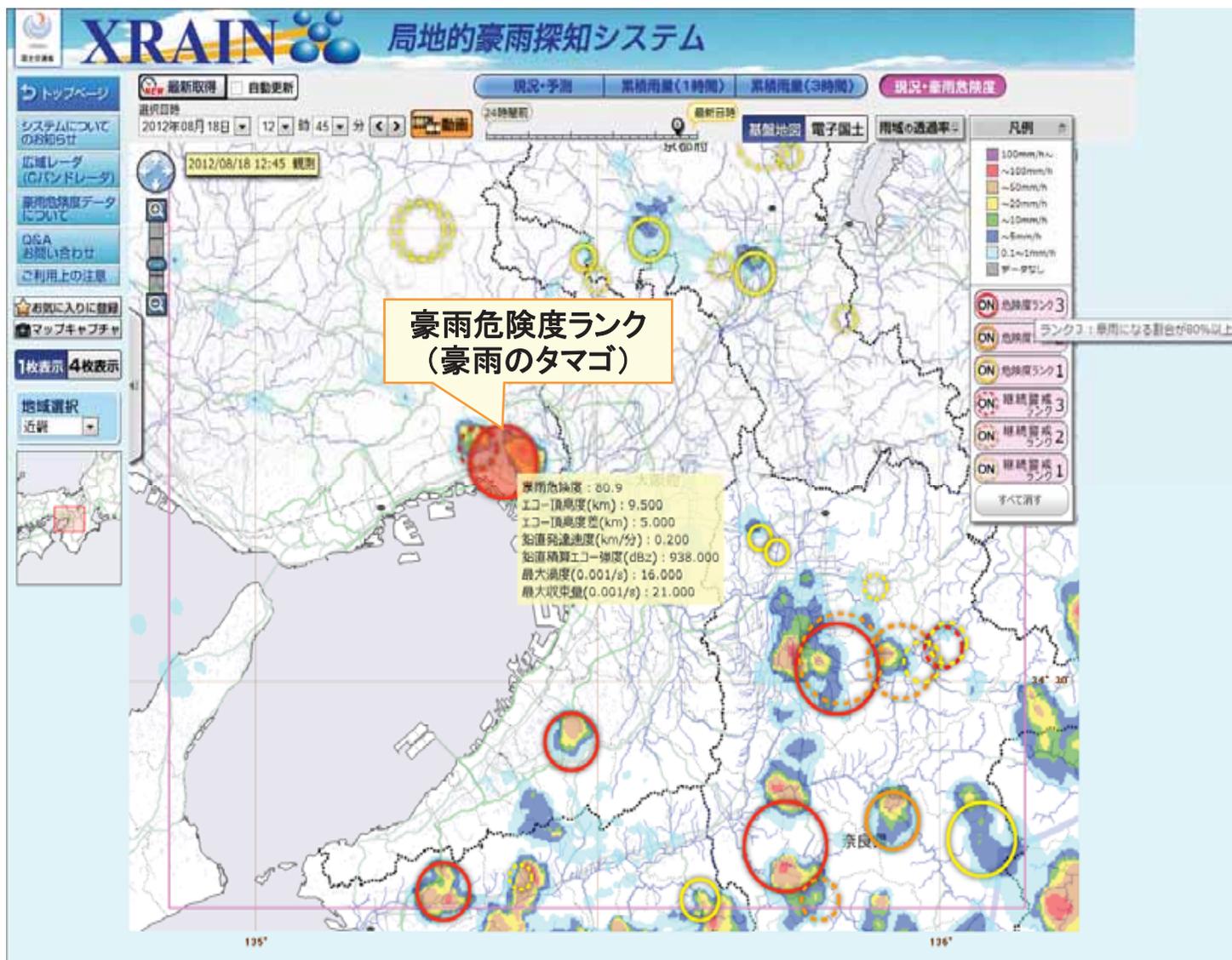


地上で降雨が開始され始めたころには、
上空で危険なセルと予測している

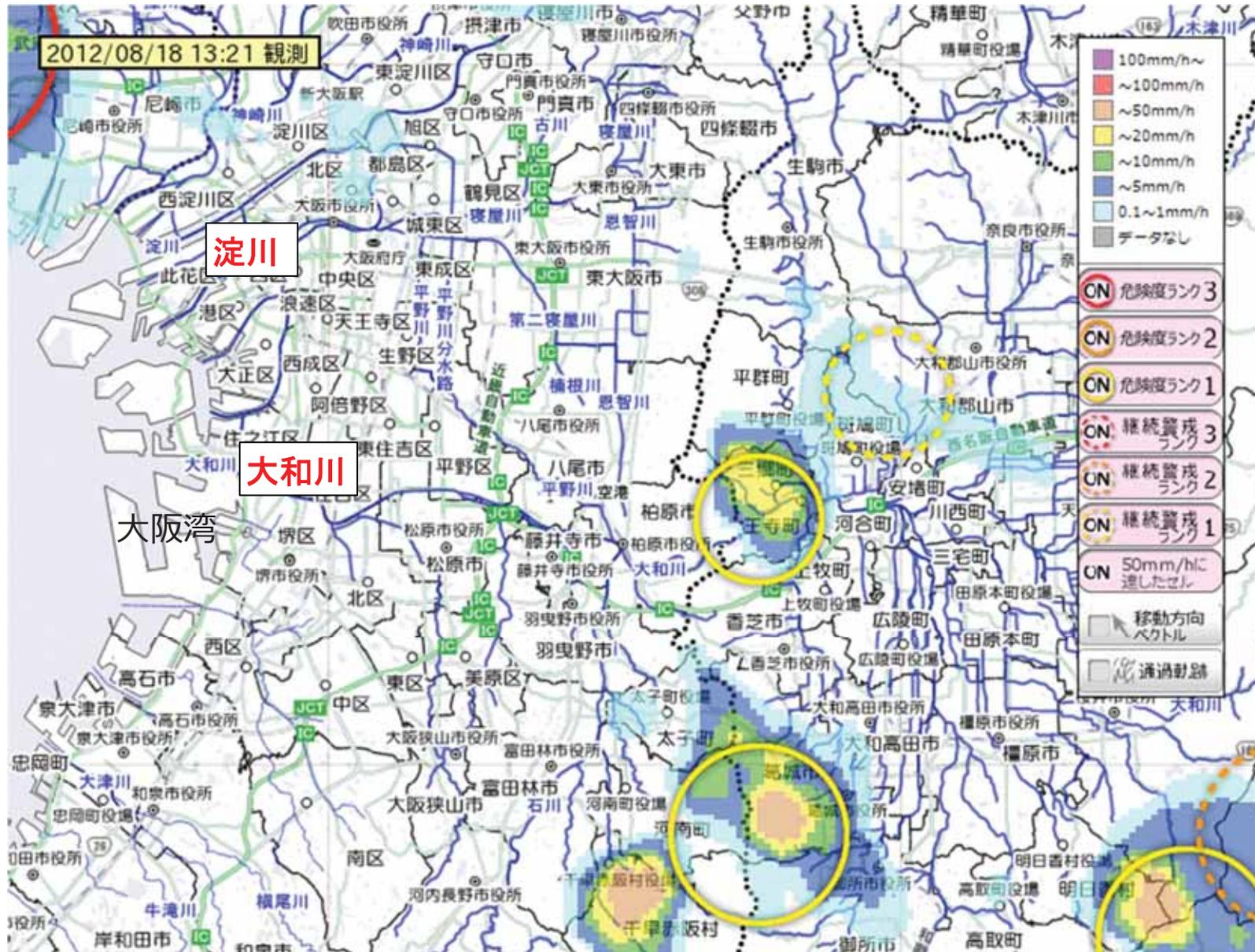
中北・西脇・山口(2014)

最新の研究成果が国土交通省で試験的に実用化されています。

国交省局地的豪雨探知システム(ゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測)



探知事例 (2012年8月18日: 大阪豪雨)



国土交通省(2015)

片山ら(2017)

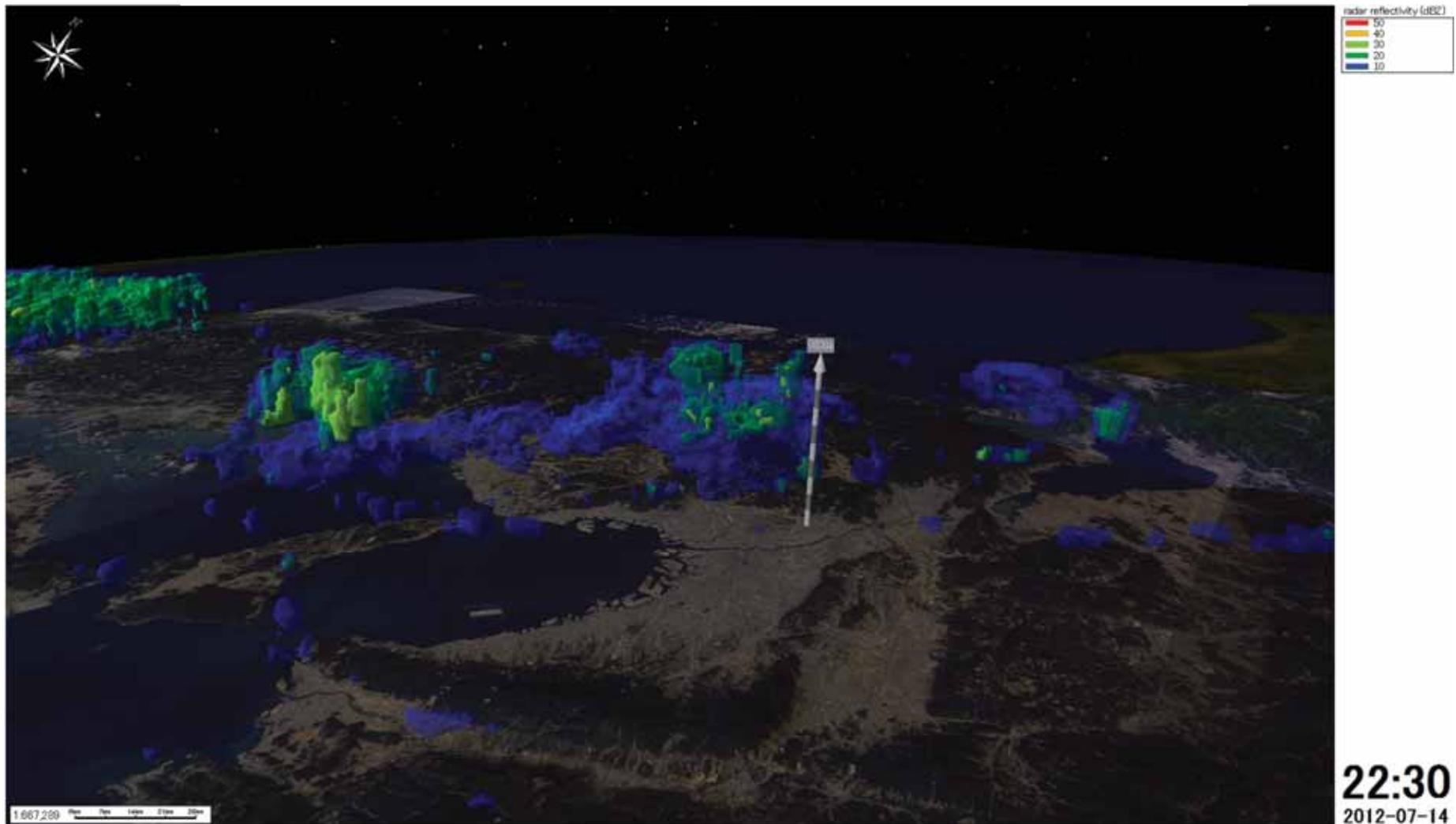
米国・オクラホマでの気象ニュース番組



情報の高度化： まずはレーダーの3次元化から！

3次元化の例： 2012年7月15日 京都・亀岡豪雨

国交省XバンドMPLレーダー観測ネットワーク(XRAIN)



雲物理過程の解明： 最新レーダーとビデオカメラの同期観測

ゲリラ豪雨と激闘! 巨大バルーン

中井 貴一 × 夢の扉+

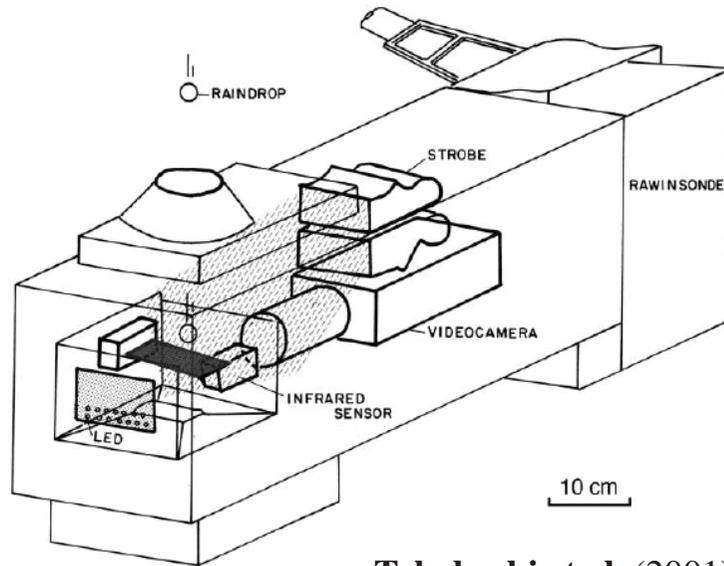
TBS



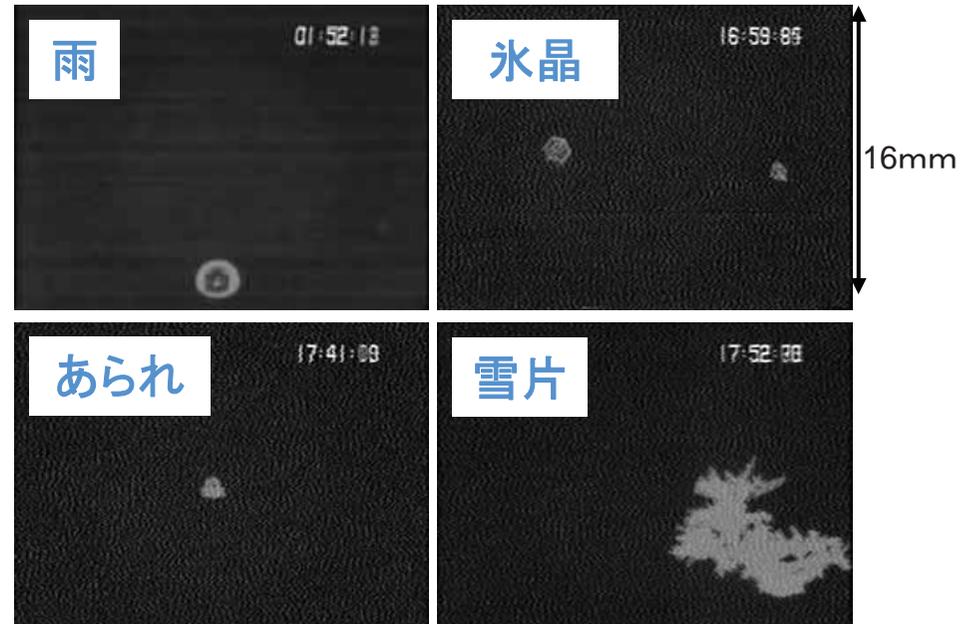
TBS夢の扉プラス



ビデオゾンデとは

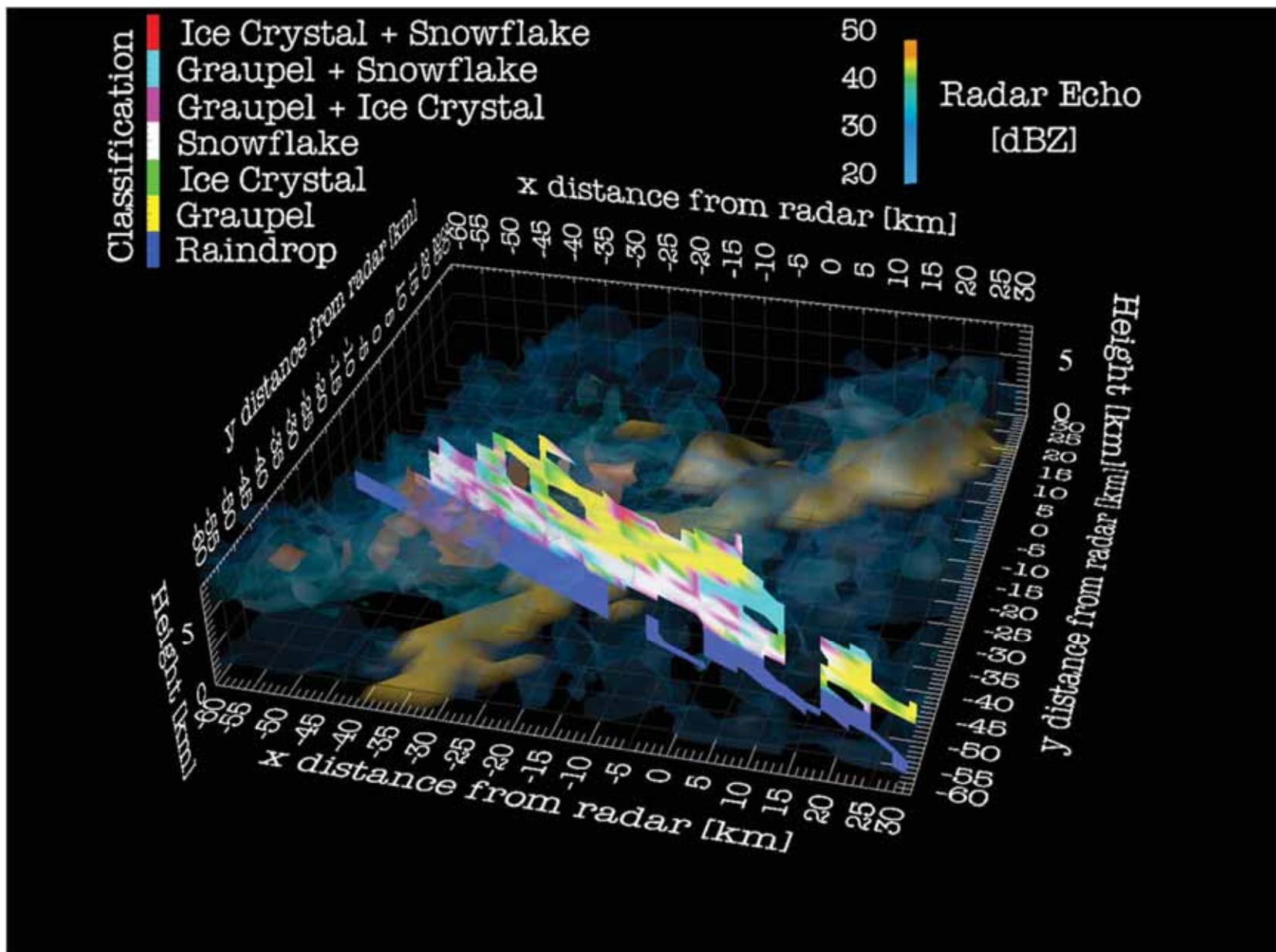


Takahashi et al. (2001)

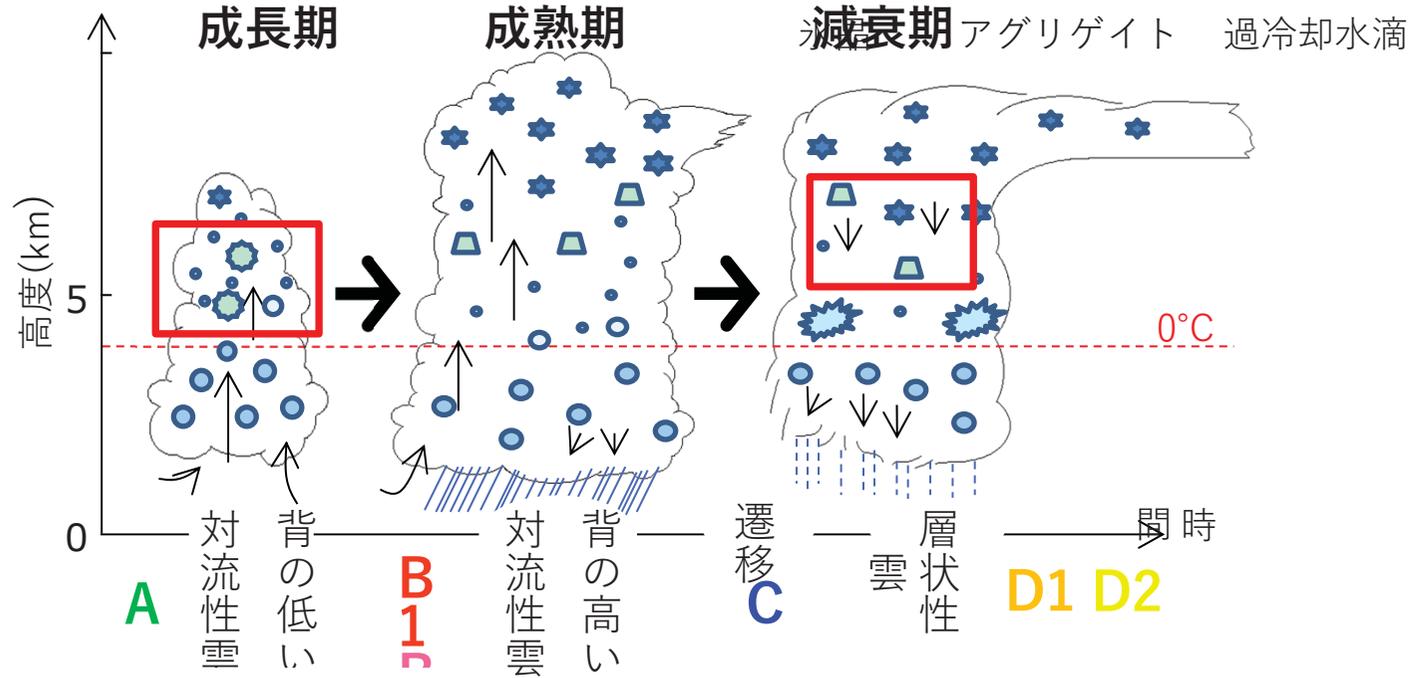


- ビデオゾンデは気球に吊り下げ、上空の降水粒子を直接撮影
- 一回の放球で1000枚程度の画像が観測される、(解析が大変)
- エクキスパートの目で、種類と大きさが判別される。
- 上空の氷相降水粒子は混在している→混在の表現を目指す。
- それを、将来の降雨予測への初期値としての導入(モデル同化)を目指した降水粒子の区分

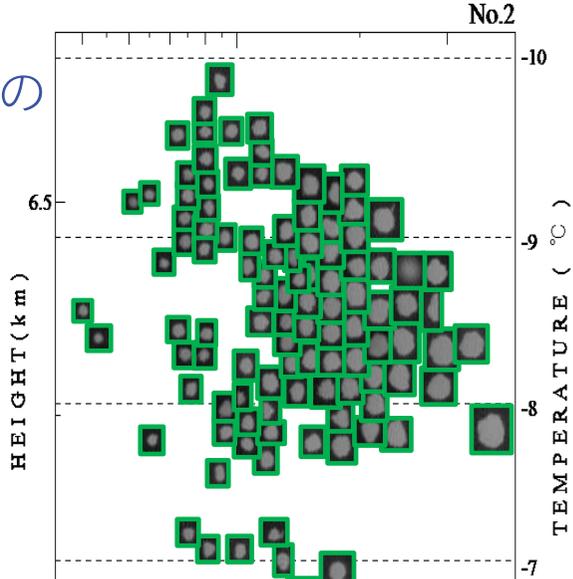
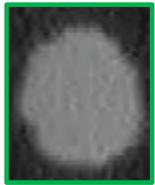
立体観測から推定した降水粒子種類の鉛直分布



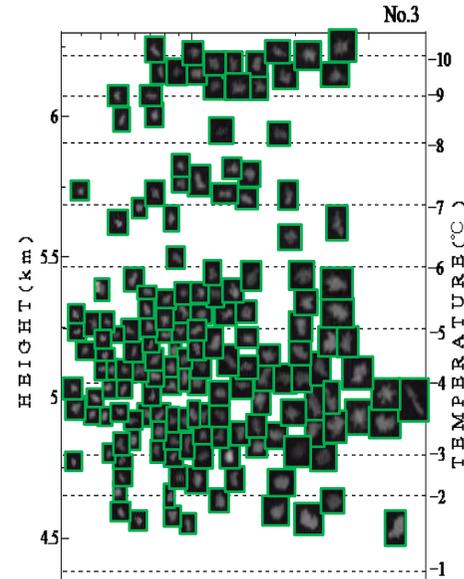
雲微物理過程の解明



丸い形状の霰が多い

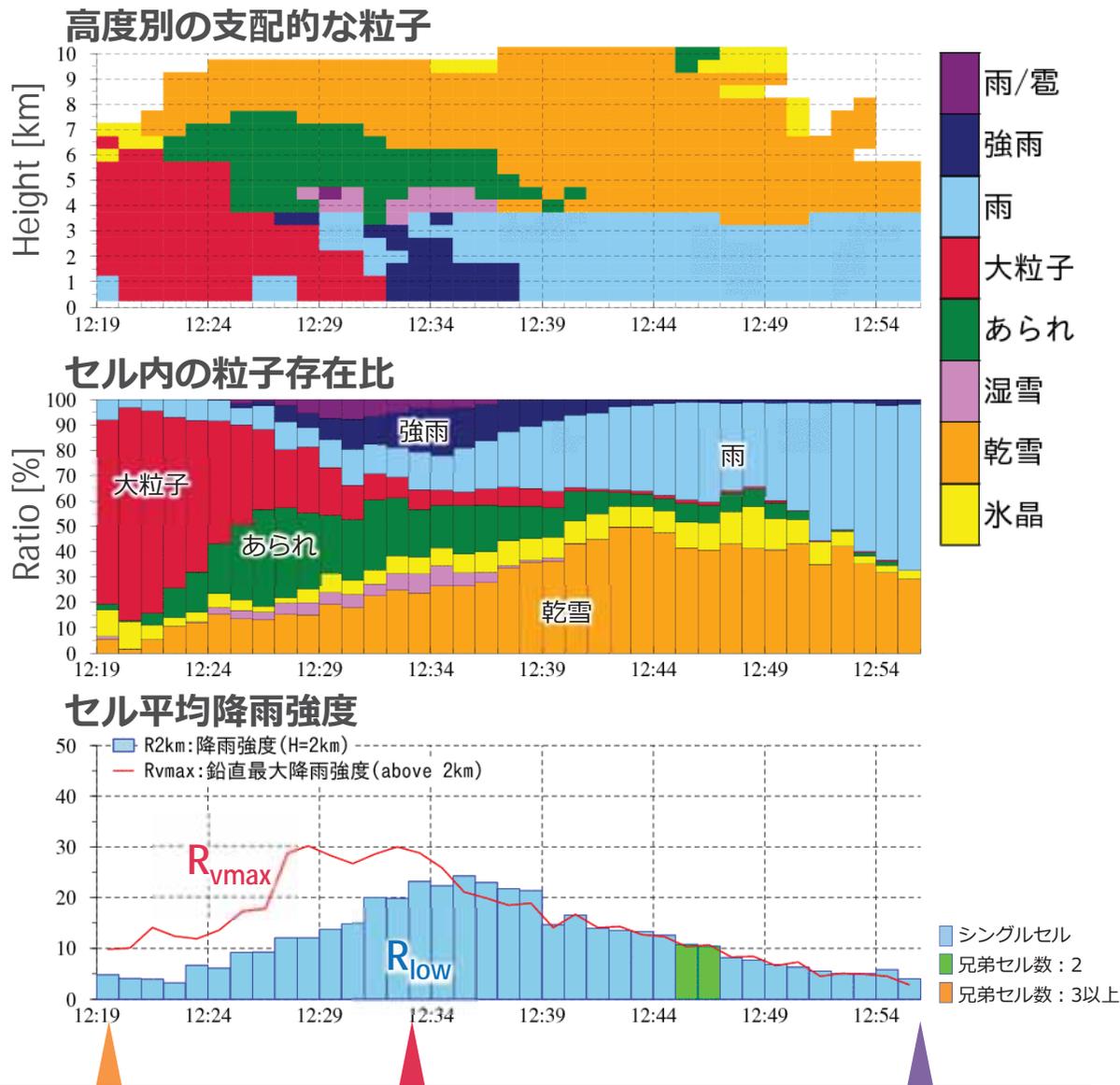
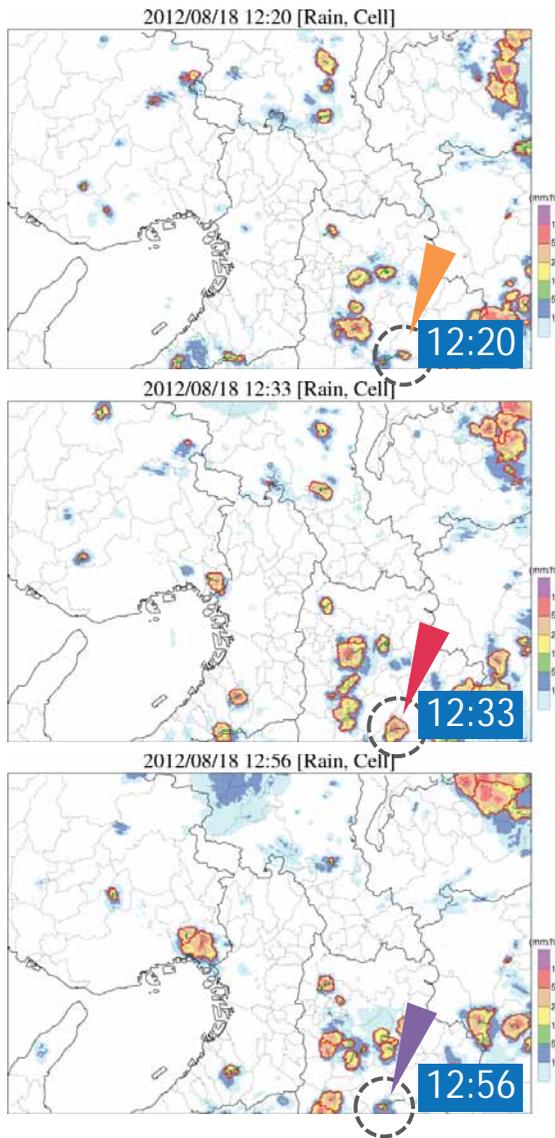


いびつな形状の霰が多い



鈴木(2011)

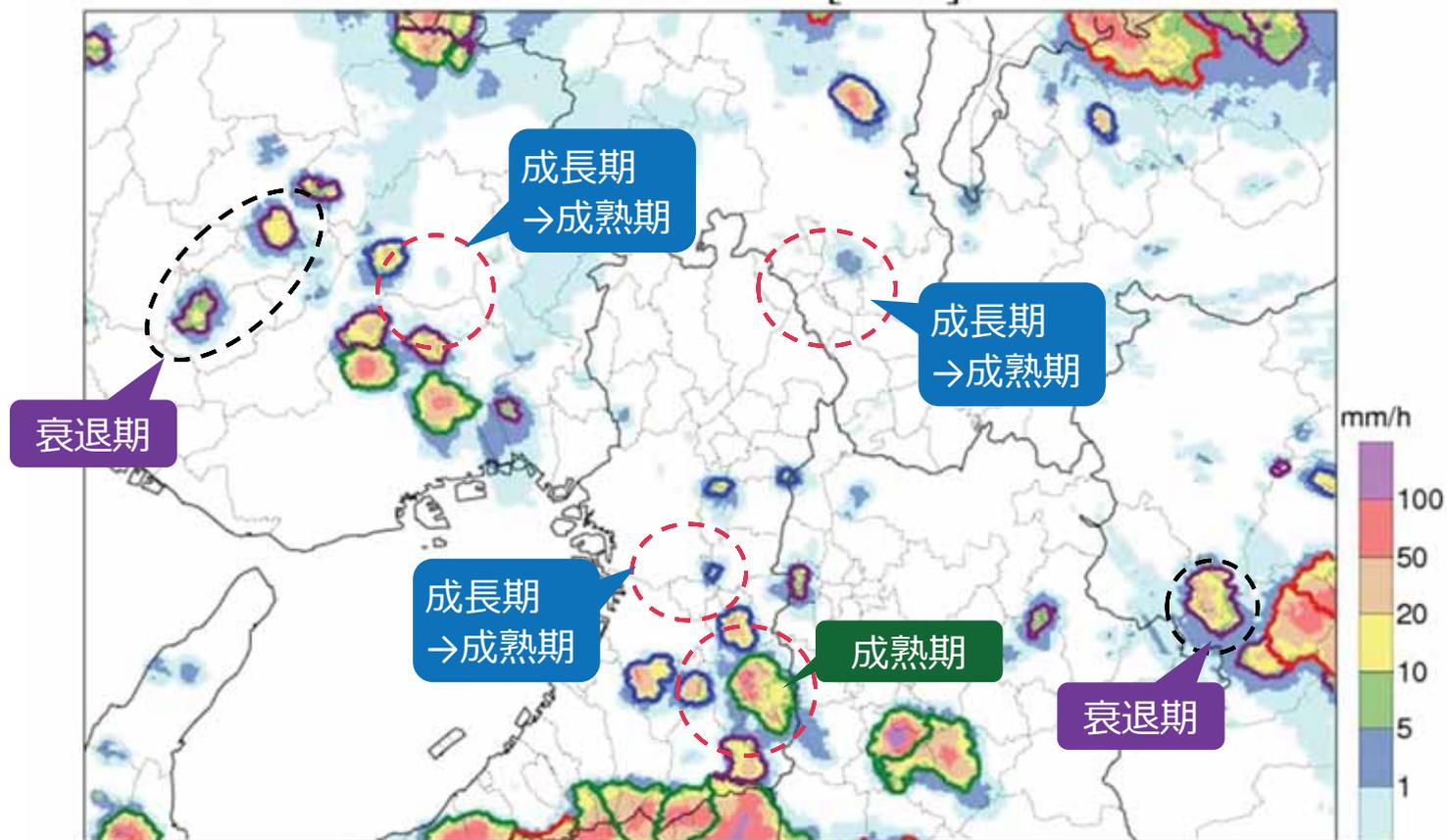
セル追跡結果×粒子判別結果 [No607]



ライフステージ判別結果

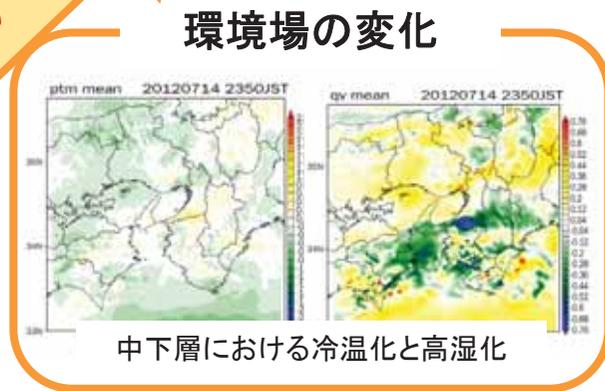
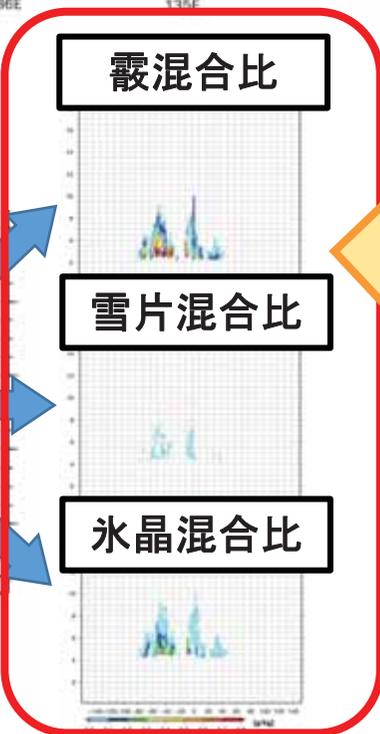
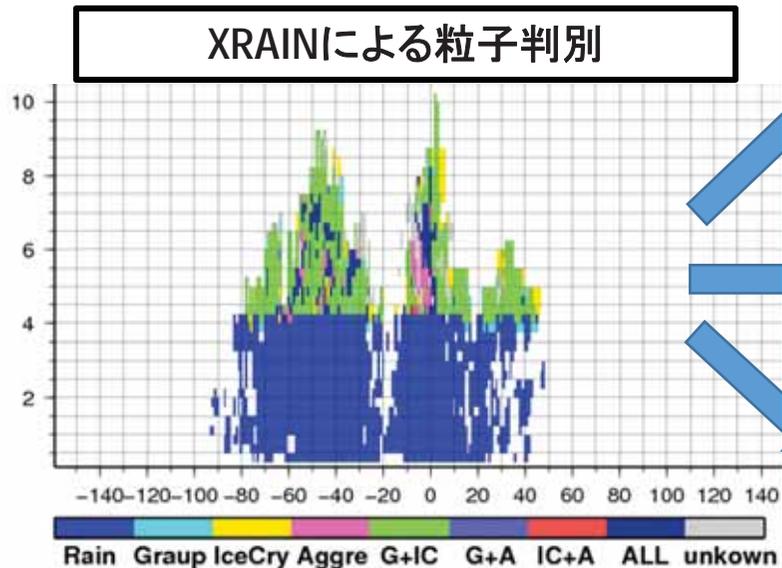
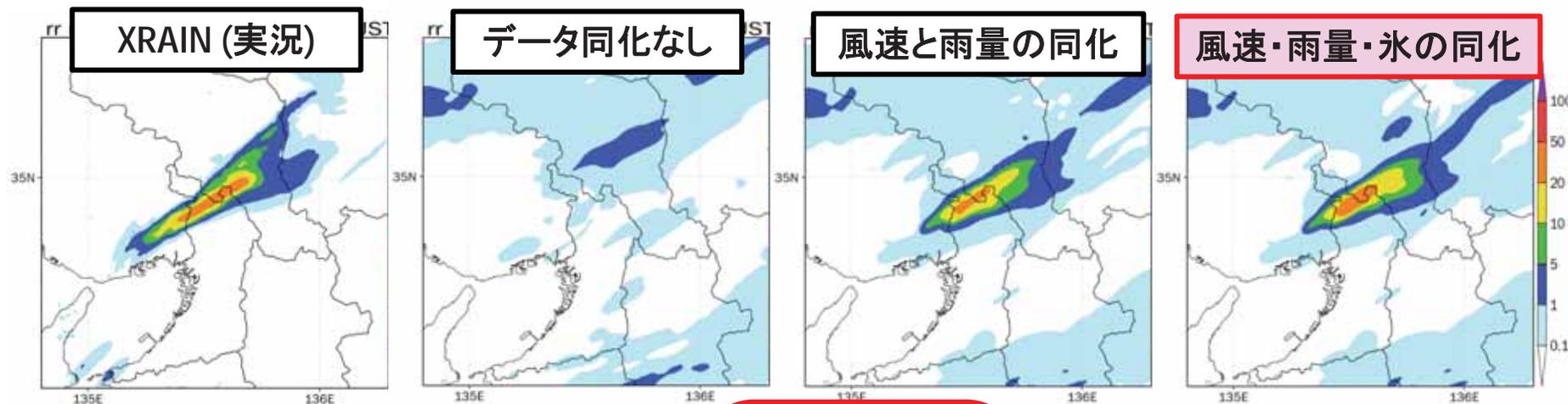
□ 成長期 □ 成熟前期 □ 成熟後期 □ 衰退期

2012/08/18 13:35 [rmax]



レーダー観測情報を活かした予測シミュレーション

2012年京都亀岡豪雨(線状降水帯)に対する観測・予測積算降水量

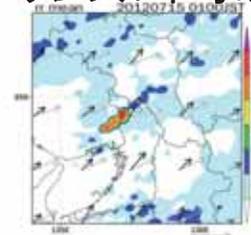
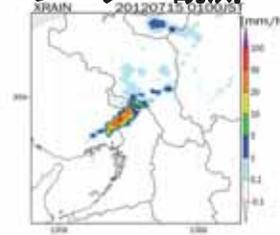


山口、古田、中北 (2015)

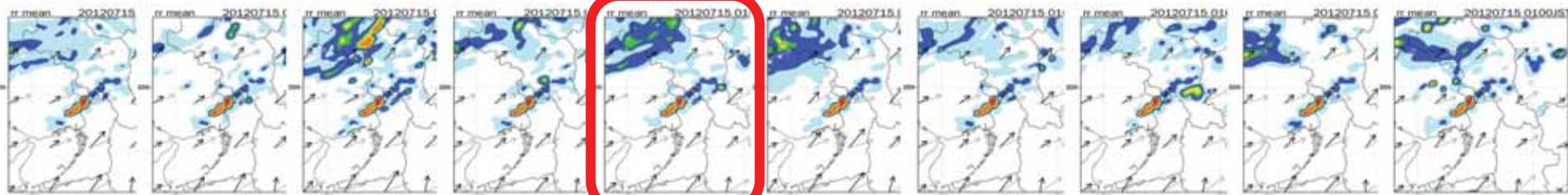
アンサンブル予報の利用

レーダー観測

アンサンブル平均の予報



#5



気象庁の週間天気予報

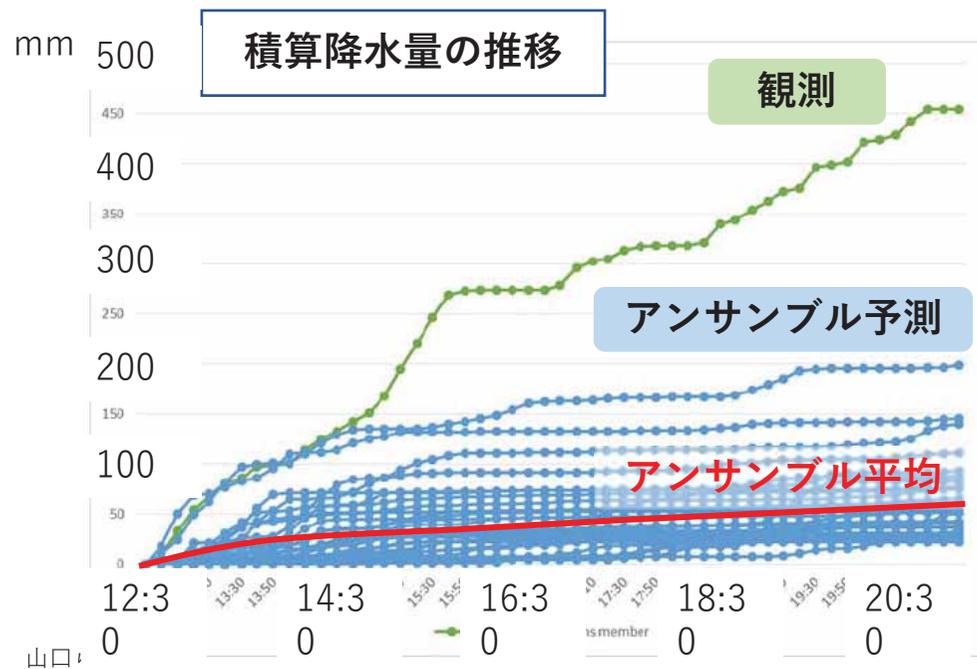
4 火 曇 	5 水 曇 	6 木 曇のち晴 	7 金 曇 	8 土 曇 	9 日 曇 	10 月 曇一時雨 
-/20/20/20	20/20/30/10	30	40	40	40	50
/	/	A	B	B	B	C

信頼度 (A:高い、C:低い)

いくつかのメンバーは精度の高い予測をしている。どのように利用するかが重要

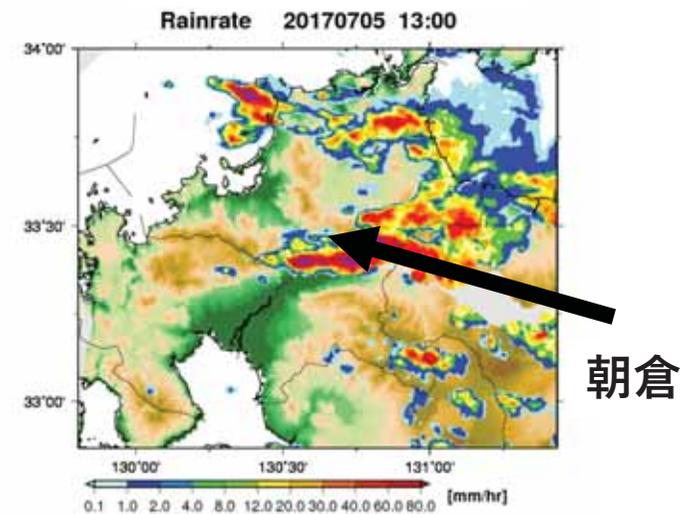
積算降水量のアンサンブル予測 H29.7月九州北部豪雨の事例

平成29年7月九州北部豪雨（線状降水帯）



アンサンブル平均 ⇒ かなり過小予測 ($\alpha = 3 \sim 10$)
 最大値のメンバー ⇒ 過小予測 ($\alpha = 1 \sim 3$)

XRAIN



- 再現性が高いメンバーが存在しうる。
- 気象は非線形・複雑系であり、正規分布をとるとは限らない。
- アンサンブル最大メンバーを超える現象も起こりうる。

予測が外れることの価値

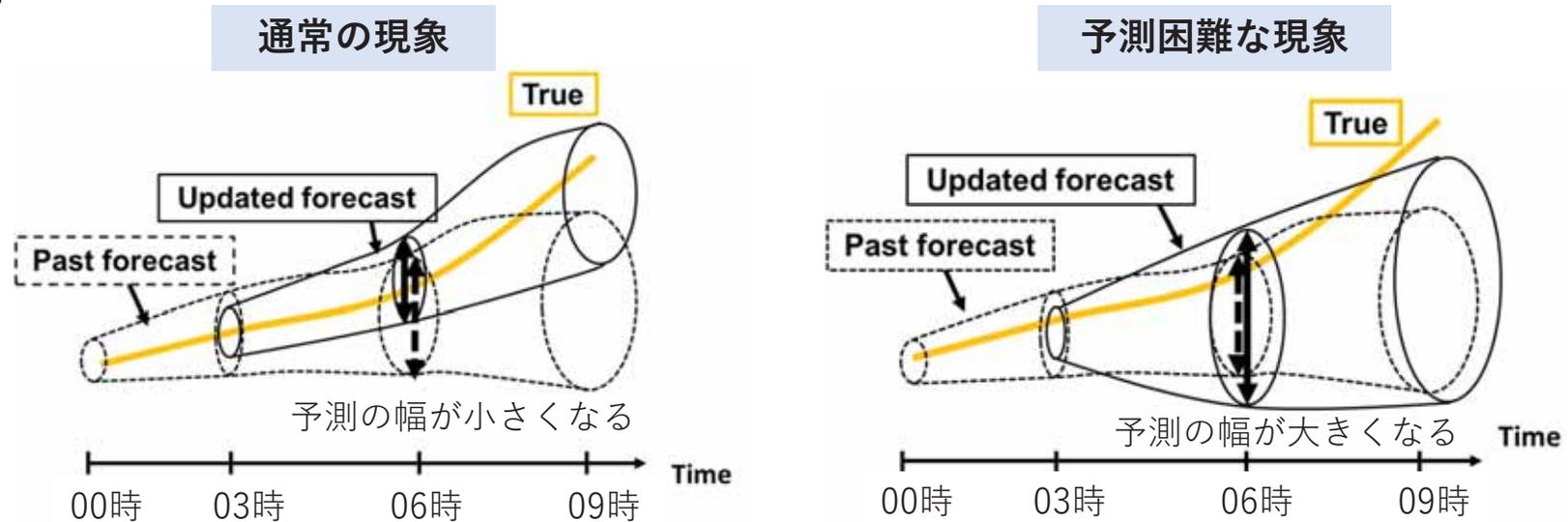
- 最大シナリオ（アンサンブル最大メンバー）を超えてくる可能性があるというリスク情報の創出が防災対応の一手目を確実に早く出すことができると考えた。すなわち、“**予測が外れること**”を**予測**することに価値がある。科学的な観点として、“正解を当てにいく予測”ではなく、“不正解を当てにいく予測”。
- 社会学的な観点として、“確実にコレが起こるという予測”が現時点で困難である以上、“コレが起こるかもしれない”という不確実な予測と向き合うほかない。しかし、社会はこの受容性を持つことが苦手。ならば逆転の発想で、“**予測しきれないようなことが起こるといふ、確かな予測**”を上手に使うよう社会の意識・体制を変革できる。

研究手法の根幹となる考え

過去の予測情報も用いる

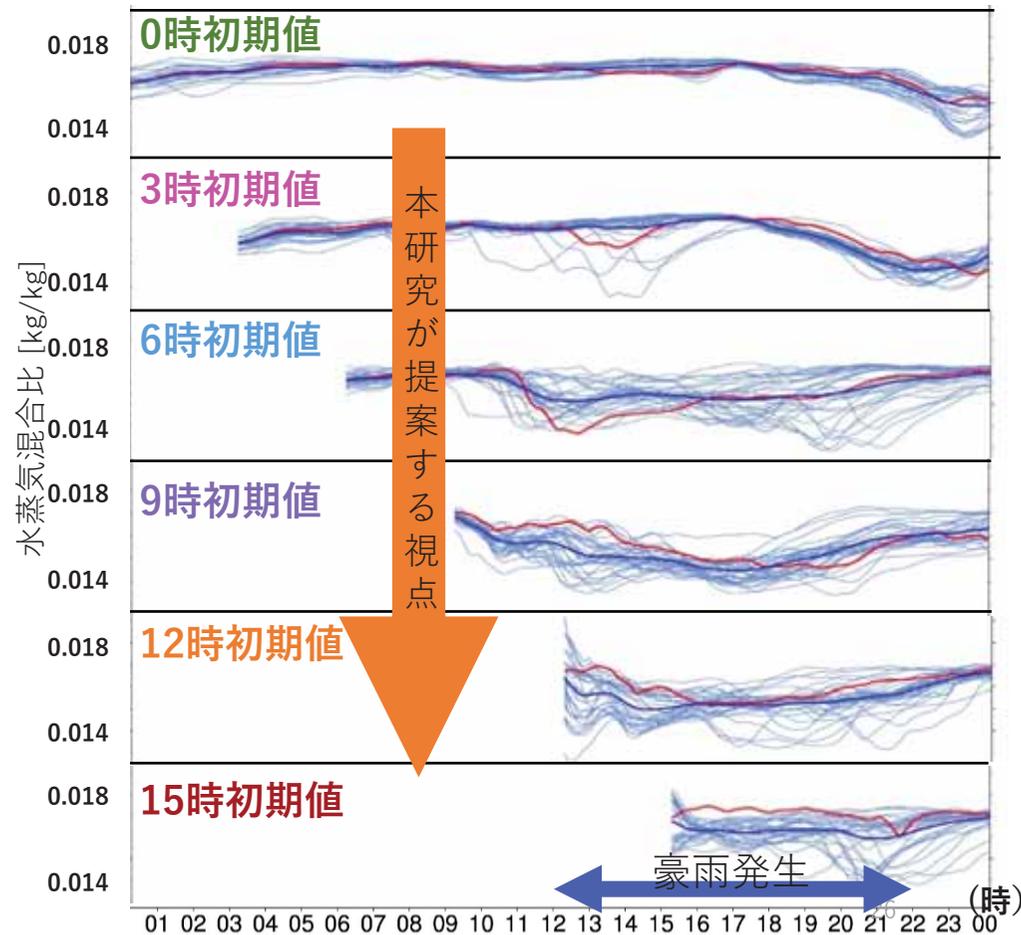
- ・ 予測困難な現象では初期値が更新されても予測精度があまりよくならない
- ・ アンサンブル予測が更新された時の変化（更新履歴）に特徴があるという仮説

説



初期値が更新されるとばらつき（予測の幅）が大きくなる度合い
→GFU(Growing Forecast Uncertainty Index)

水蒸気量のアンサンブル更新履歴 (2017年九州北部豪雨事例)



- 左から右に見るのではなく、**上から下に見る（更新履歴）**が本研究が提案する視点。
- 3時初期値のアンサンブル予測の幅を見ると、0時初期値と比較して、ざわめき始めている。時間を追うごとに顕著。

— アンサンブルメンバー
— コントロールラン
— アンサンブル平均

ばらつきの空間分布

09:00

12:00

15:00

18:00

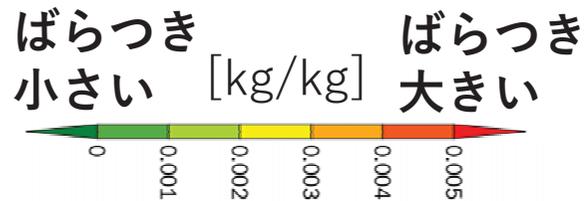
21:00

0時初期値

3時初期値

6時初期値

9時初期値



12時初期値

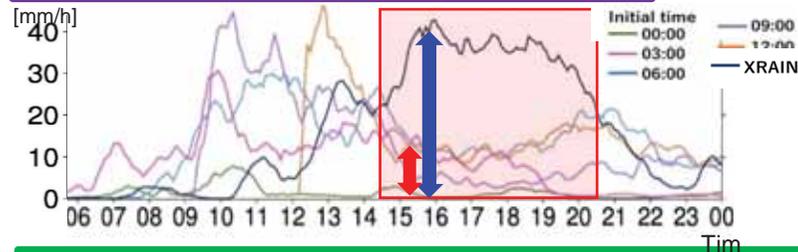
15時初期値

新しい予測になる

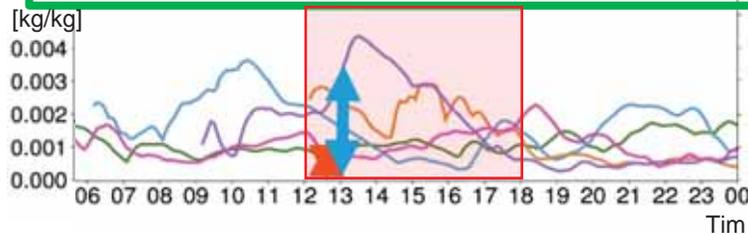
最悪ケース雨量予測への検討

アンサンブル最大メンバーで α 値を作成

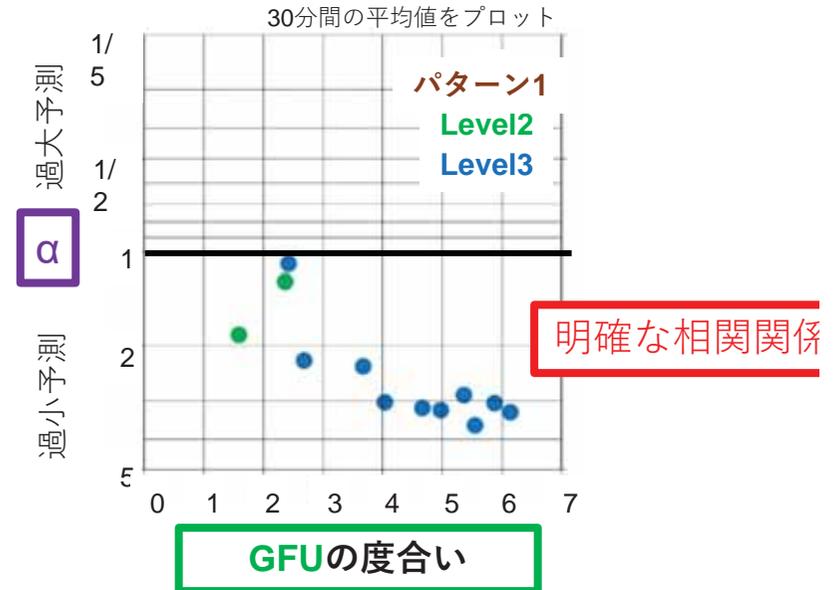
領域平均降雨強度(アンサンブル最大)



上流側の水蒸気混合比@750m 予測のばらつき



パターン1の度合いもGFUの度合いも大きい時、 α は大きい（より過小予測）



- GFUが大きいほど（＝予測が更新されるとばらつきがむしろ大きくなる度合いが高いほど）、予測が過小評価していた。
- この関係を利用すると、GFUが大きいとアンサンブルの予測の幅を超えて危険な何かが起こる可能性がある。

1. 発達に関する近年の研究

- ✓ 気象レーダー観測による危険な豪雨のタマゴの探知
- ✓ 雲物理過程の理解の進化とモデル同化予測
- ✓ アンサンブル予測

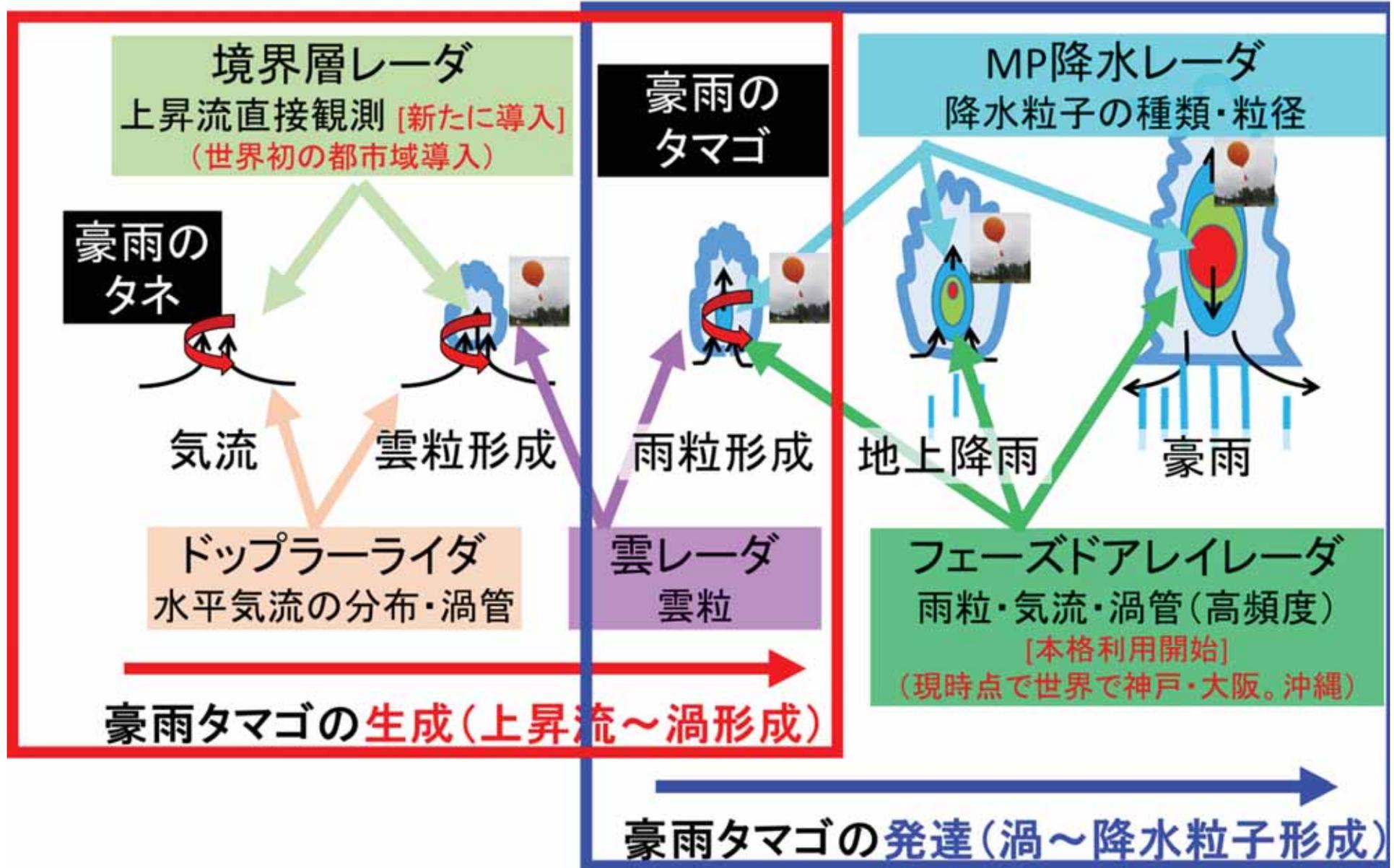
2. 生成に関する近年の研究

- ✓ 時代は、降水だけでなく、降水・雲・水蒸気のステージへ
- ✓ マルチセンサーを用いた観測
- ✓ 都市の熱効果・形状効果を考慮できる数値モデルの開発

3. 気候変動下における豪雨の将来変化

- ✓ 梅雨豪雨の将来変化

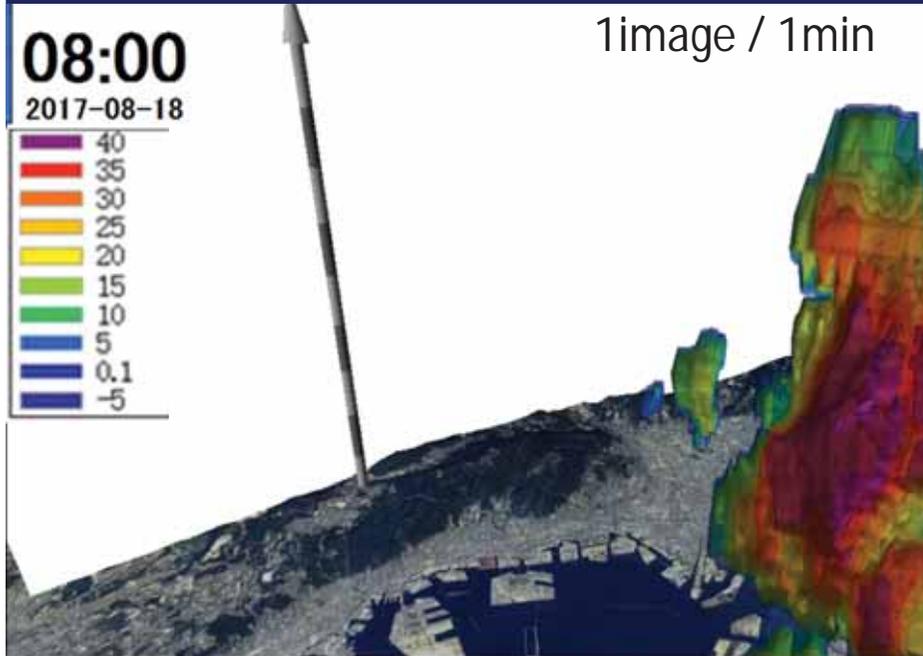
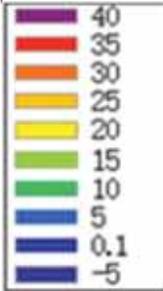
豪雨の生成と発達を捉える観測



XRAIN 反射強度

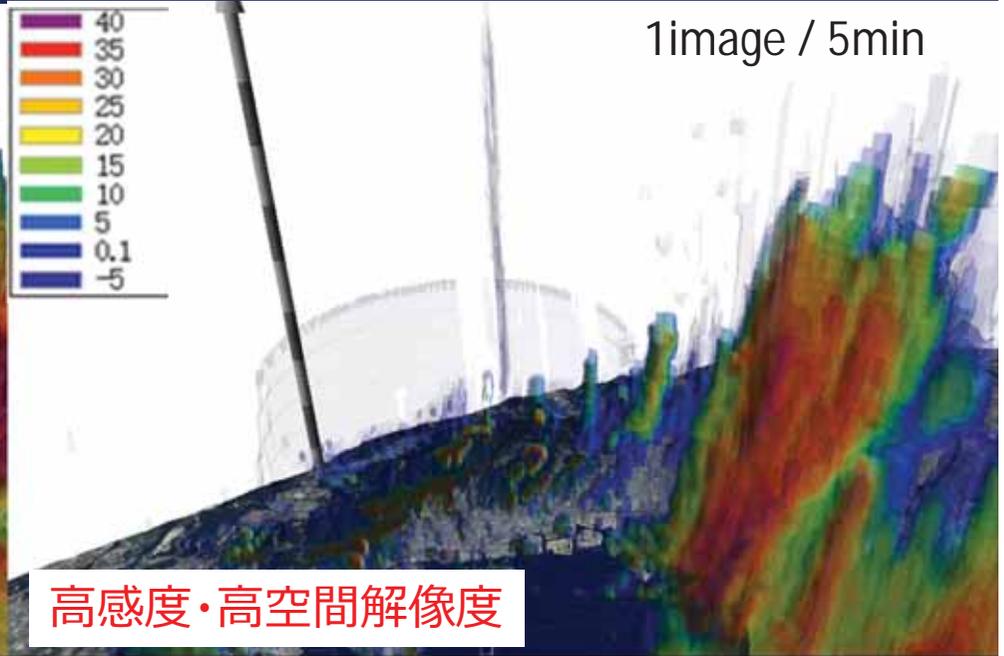
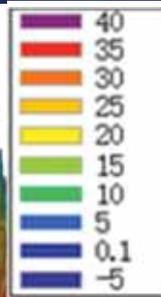
1image / 1min

08:00
2017-08-18



雲(Ka帯)レーダー 反射強度

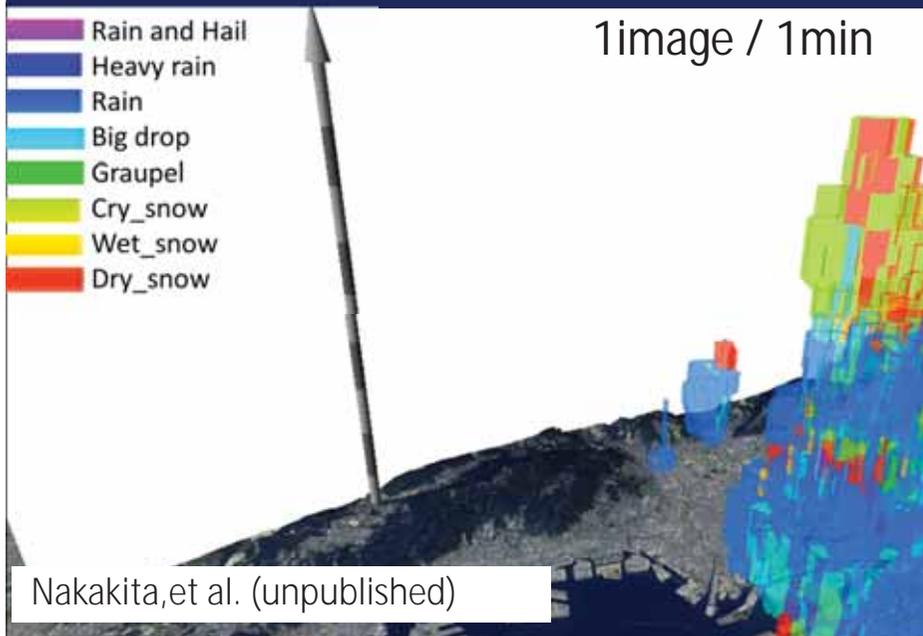
1image / 5min



高感度・高空間解像度

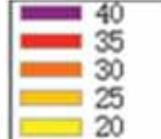
XRAIN 粒子判別

1image / 1min

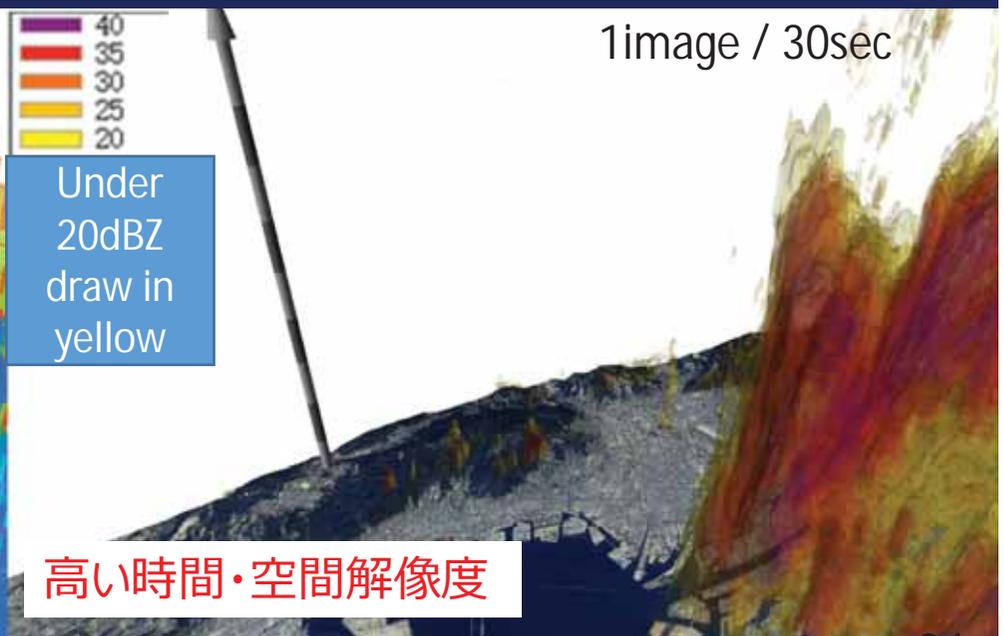


フェーズドアレイレーダー 反射強度

1image / 30sec



Under
20dBZ
draw in
yellow



高い時間・空間解像度

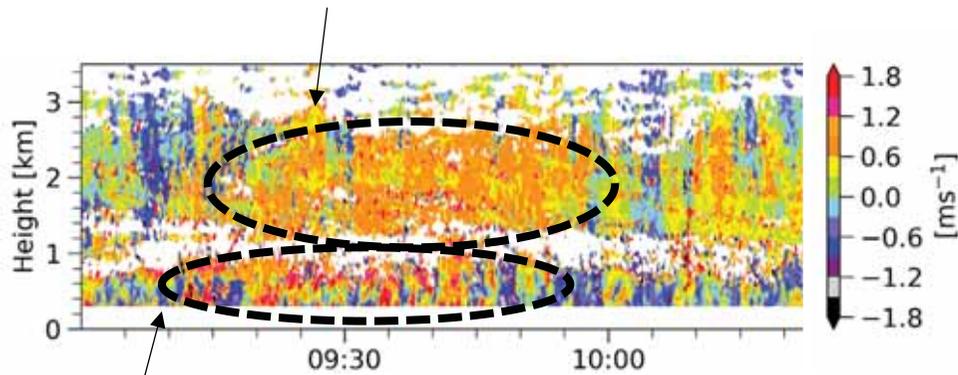
Nakakita, et al. (unpublished)

境界層レーダー (都市上空の熱的上昇流を捉える)

境界層レーダー

2018年8月21日@神戸

境界層より上空で、継続して上昇流を確認。



9時過ぎから、境界層内部では、強い上昇流と下降流が交互に発生(通過)

タイムラプスカメラ



徐々に積雲が発生

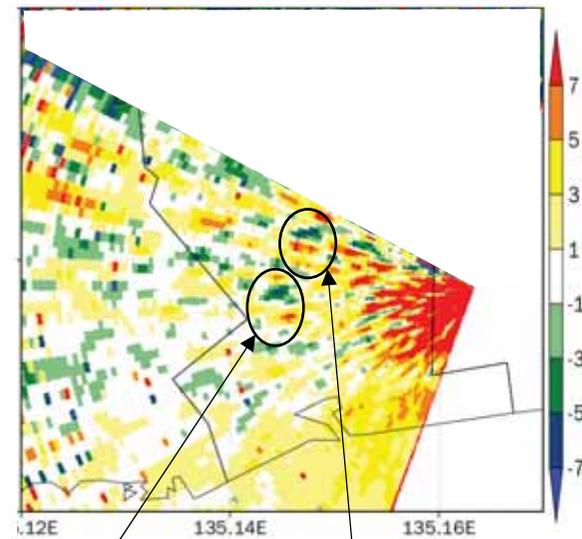
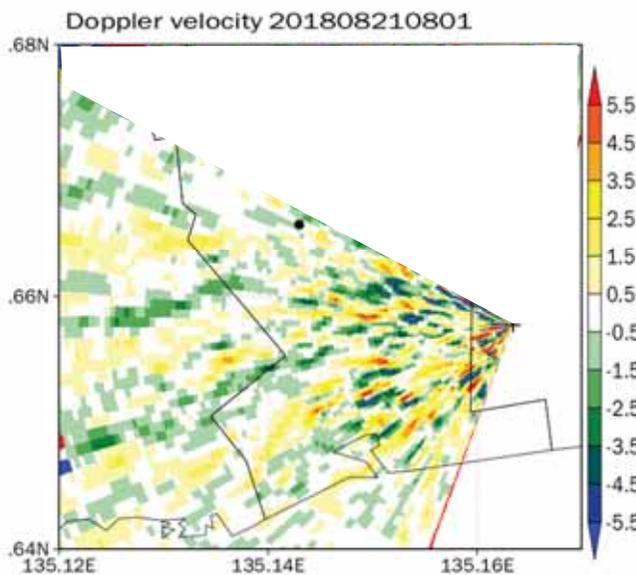
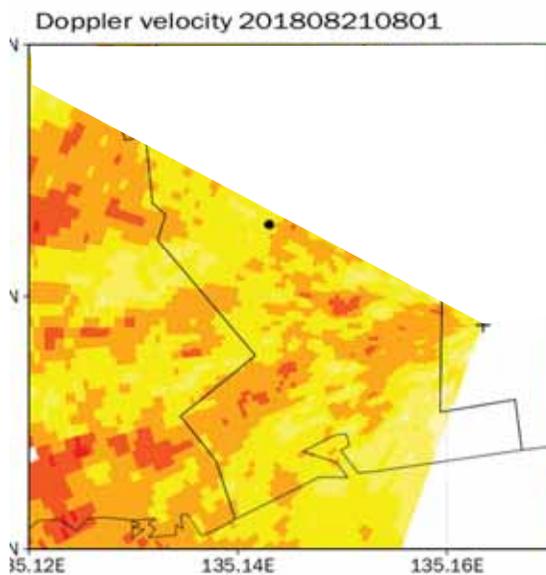
ドップラーライダー観測 (晴天時の気流を捉える)

8/21 08:00~13:00の5分ごとの動画

ドップラー風速

鉛直渦度

鉛直渦度の
4時間平均値



丘の手前
高層ビル群

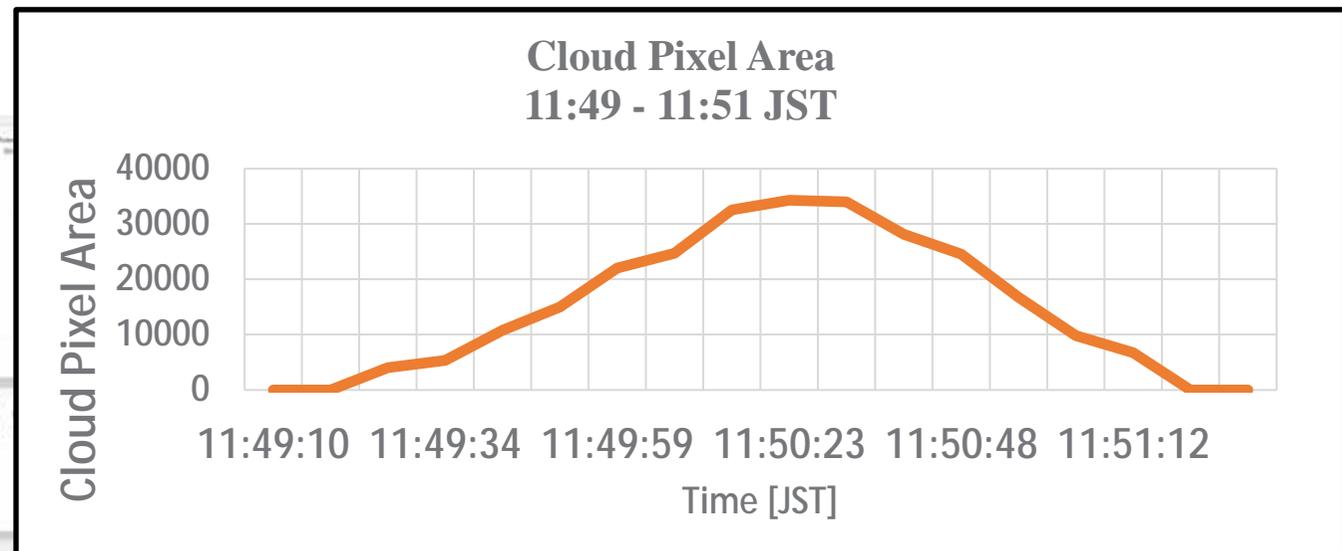
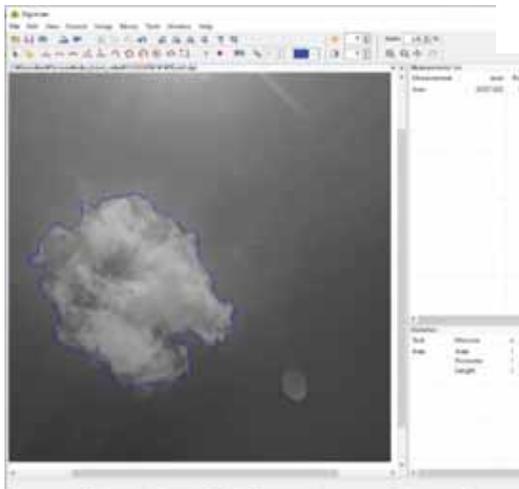
タイムラプスカメラ（30秒毎）



雲底に**気流渦**を確認

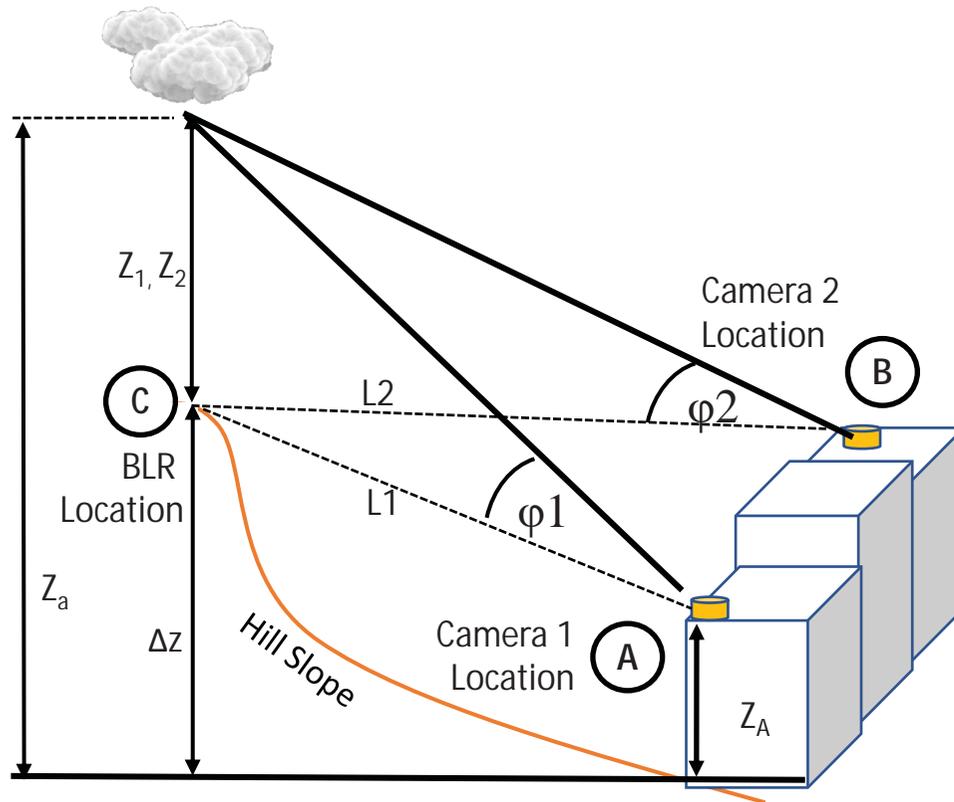
タイムラプスカメラ（雲量）

- ❑ The first step is to collect event of first generated cumulus cloud from camera. There are two information that we collect : (1) Cloud pixel area, (2) Estimated cloud height.
- ❑ Cloud pixel area is represented by the area of cloud in cloud pixel from the image of the time-lapse camera. We used digimizer software to get the cloud pixel area.
- ❑ Digimizer software is used as image analysis software to calculate the cloud pixel from the image. Digimizer is usually used in a study that needs image analysis (Chenari and Mottaghian, 2020; Hu et al., 2020).



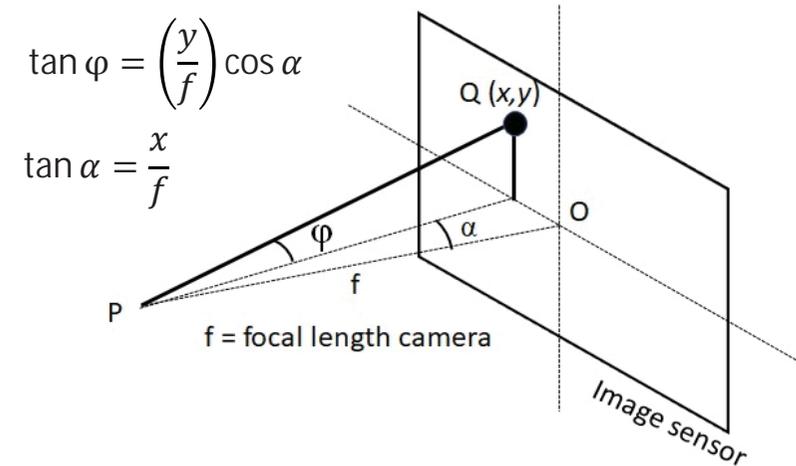
(Ari, Yamaguchi and Nakakita, 2021)

タイムラプスカメラ（雲の高度推定）



$$Z_a = 0.5(Z_1 + Z_2 + \Delta Z) + Z_A$$

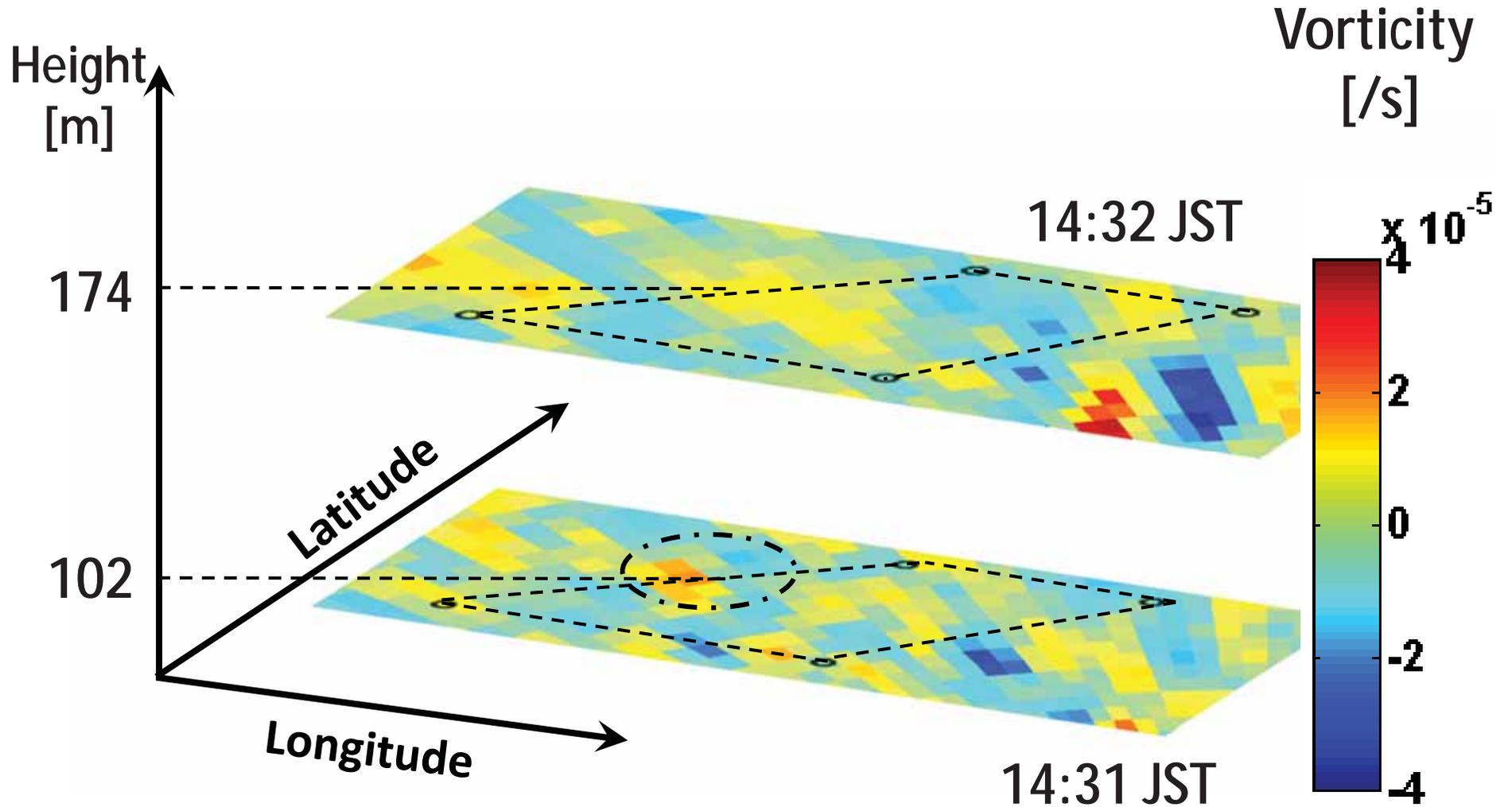
$$Z_1 = L_1 \tan \varphi_1 \quad Z_2 = L_2 \tan \varphi_2$$



- ❑ Another information from cloud image is the estimated cloud height.
- ❑ From cloud image, we choose only the first image of the first generated cloud.
- ❑ We estimate the cloud height using stereo-photogrammetry method (Misumi et al., 2017).
- ❑ We modified the method by using already known distance of L1 and L2.

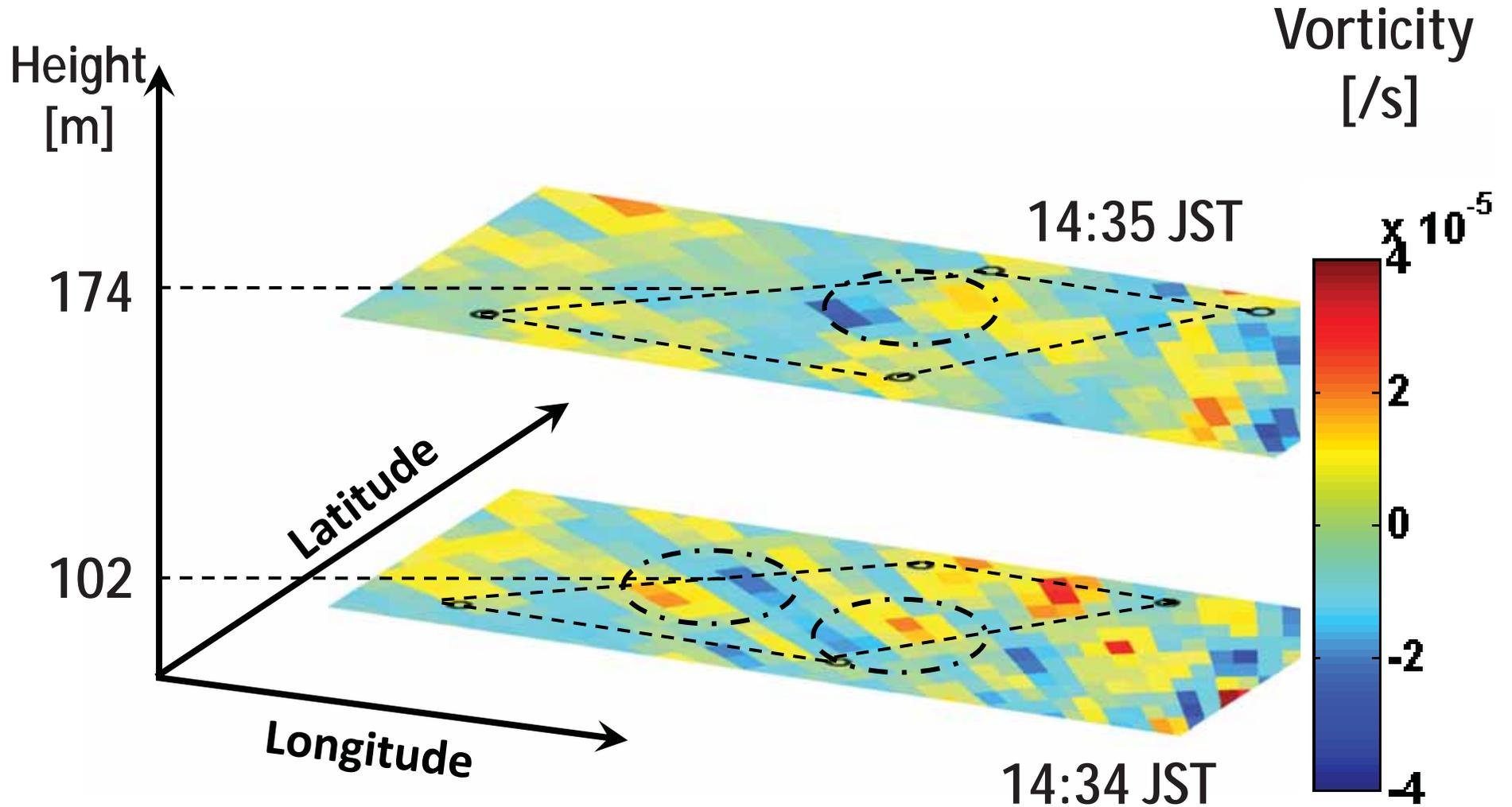
(Ari, Yamaguchi and Nakakita, 2021)

ドップラーライダー観測 気流渦 (積雲生成前)



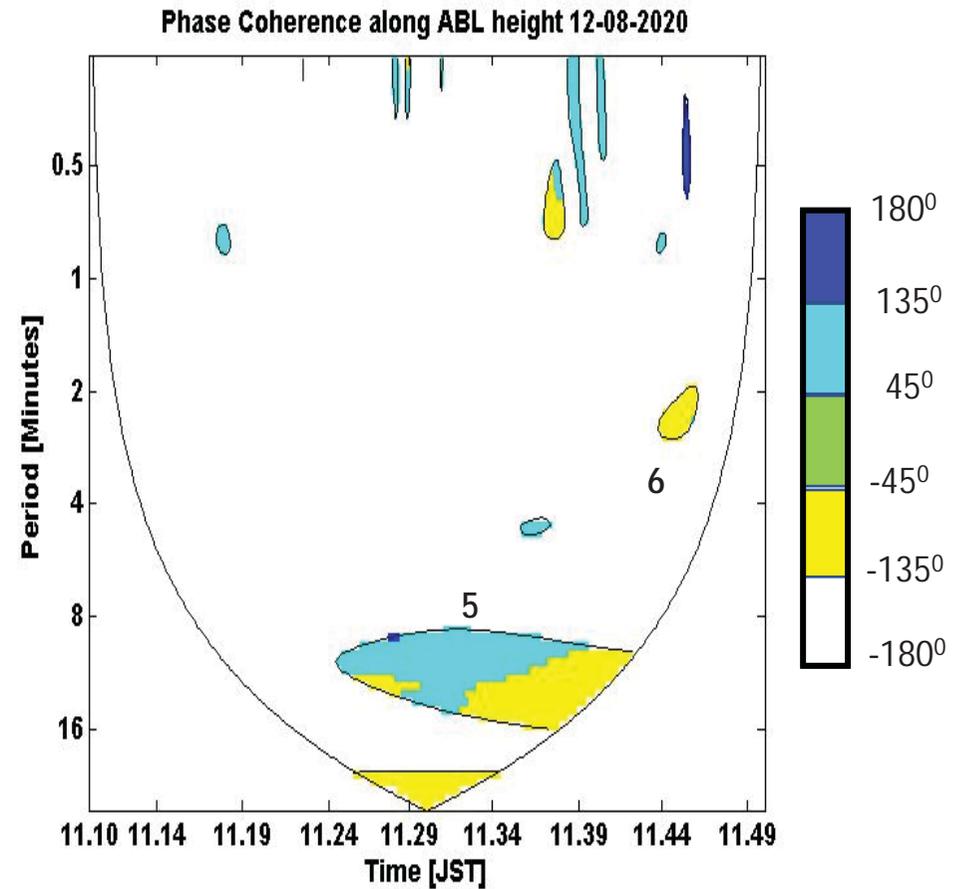
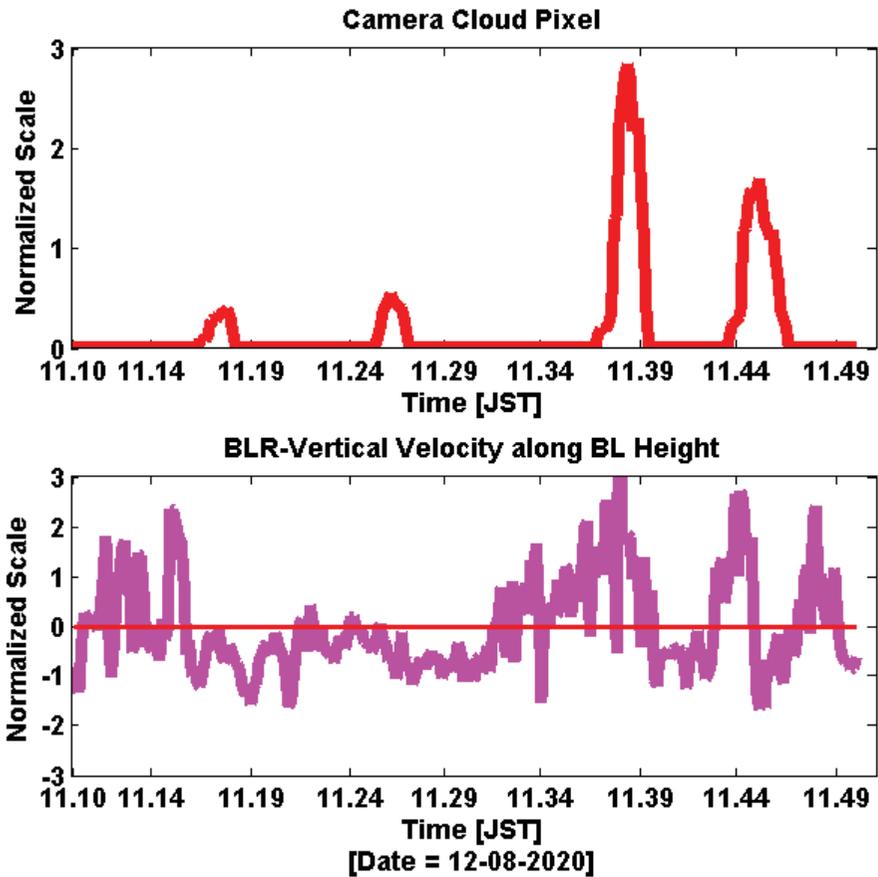
(Ari, Yamaguchi and Nakakita, 2021)

ドップラーライダー観測 気流渦 (積雲生成前)



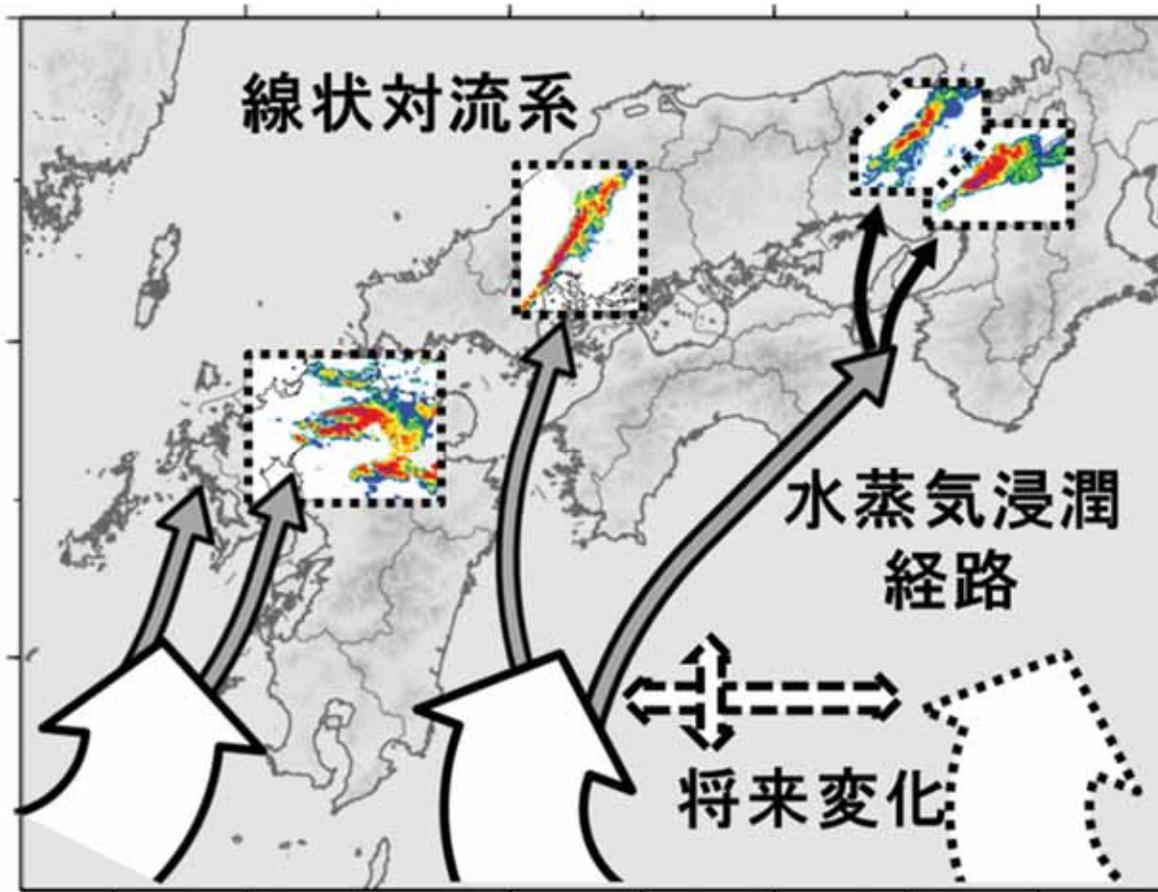
(Ari, Yamaguchi and Nakakita, 2021)

雲量 (カメラ) と上昇流 (境界層レーダー)



(Ari, Yamaguchi and Nakakita, 2021)

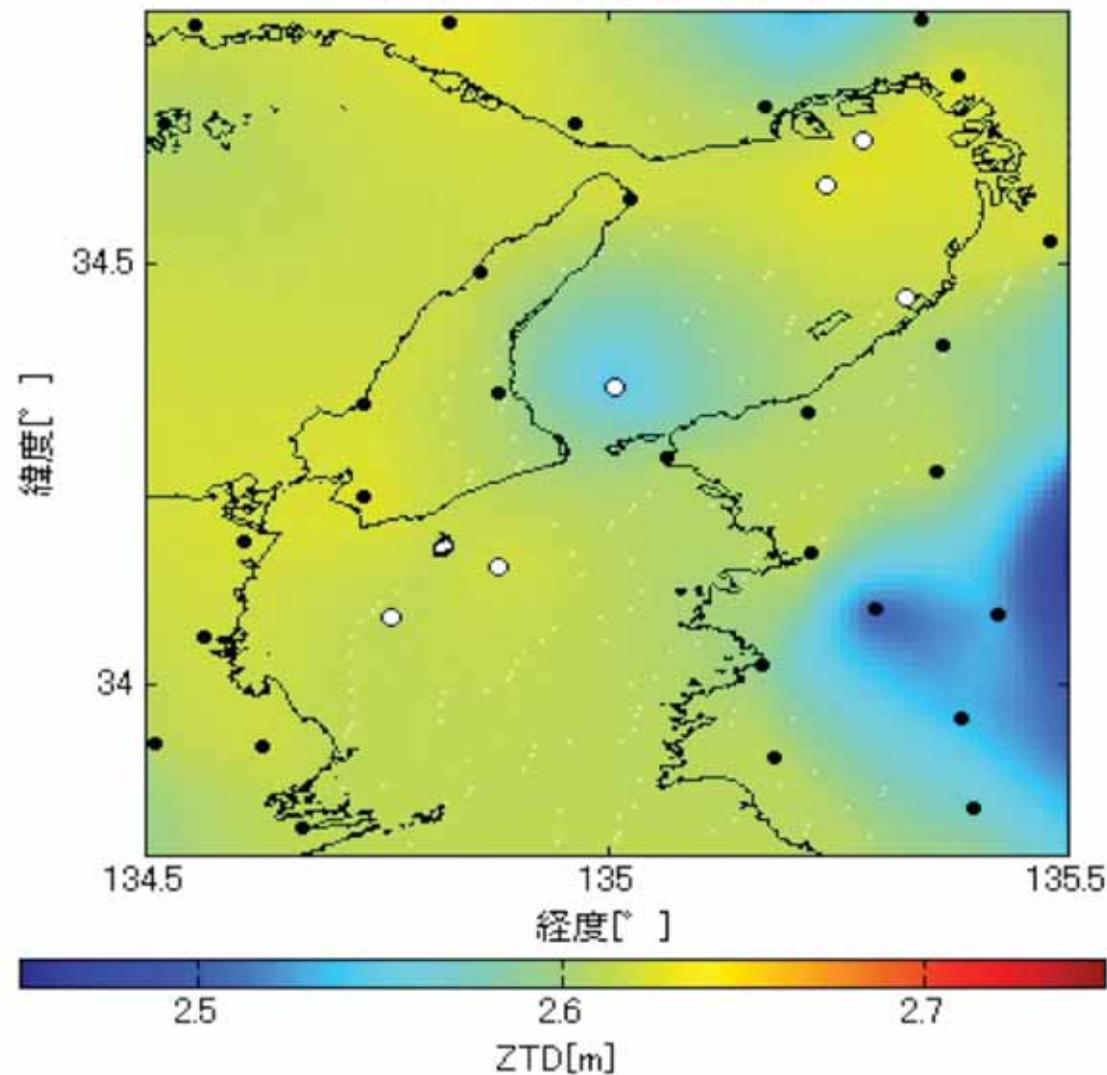
近未来、重要となる水蒸気観測



海洋GNSS (GPS) による水蒸気の鉛直積算量観測

台風12号(9/3午前10時前に高知県東部に上陸)
GPS気象 8/31(水)0:00~9/03(土)23:59 (UTC)

2011/08/31 02:40:00(UTC)

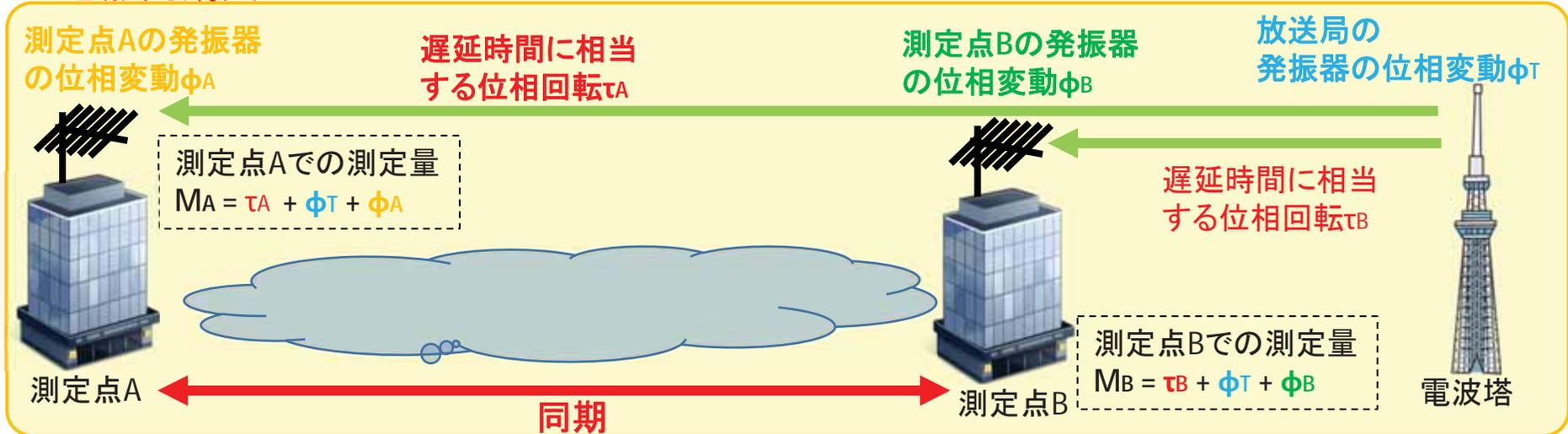


大石、中北(2011)

地上デジタル放送波を利用した大気下層の水蒸気量推定

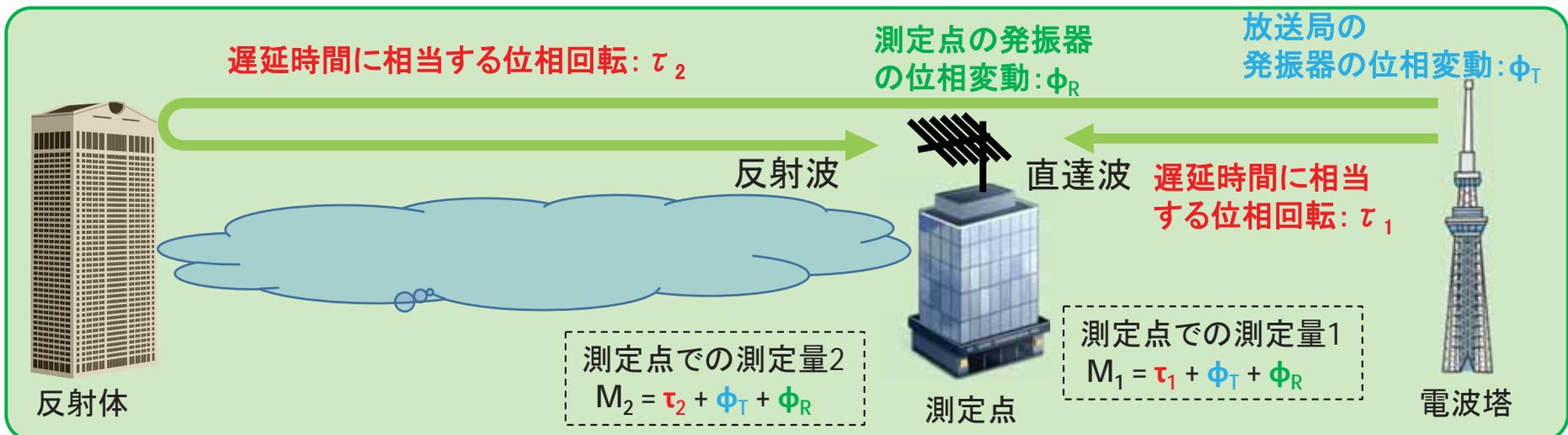
川村(2016)

2地点同期法



多点展開に有利(同期の部分に光ファイバー・CATVを用いて現在実証実験中)

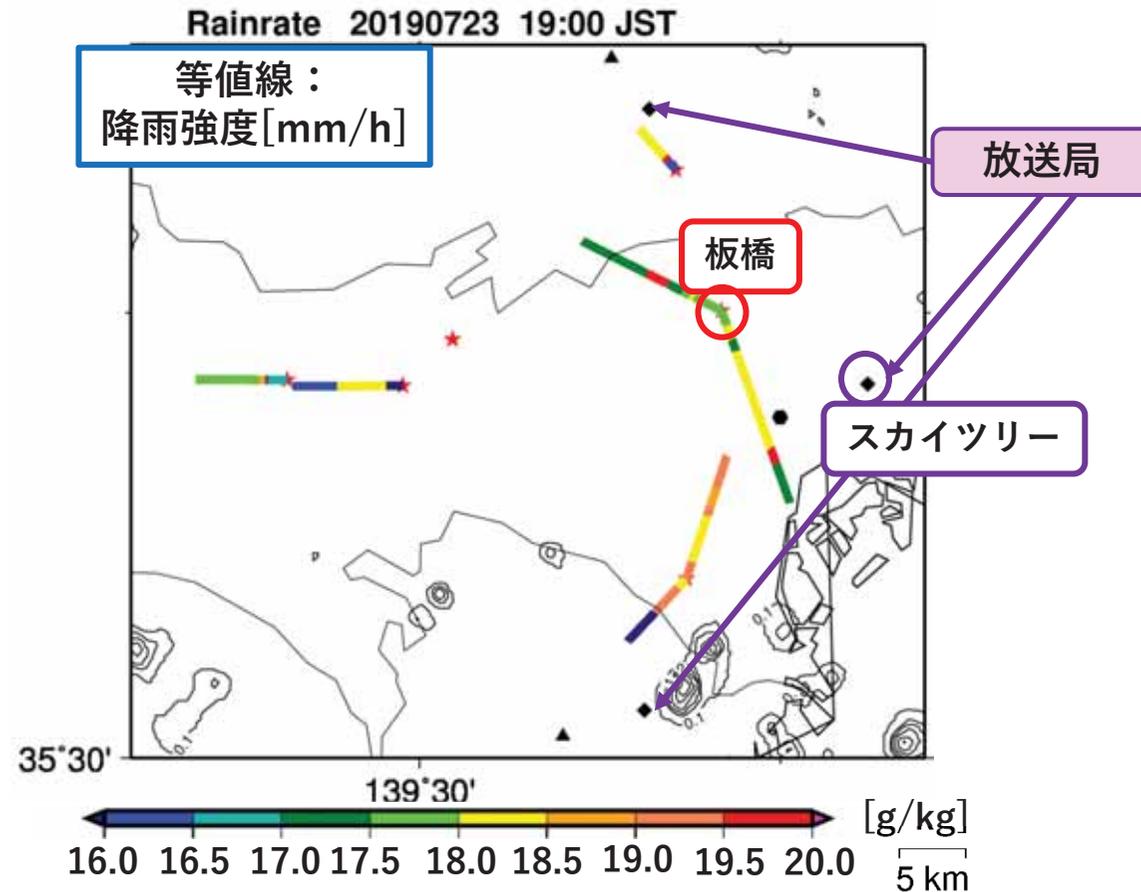
反射法



配置の条件に制約はあるが、うまく反射体が見つかる場合は同期不要で観測できる

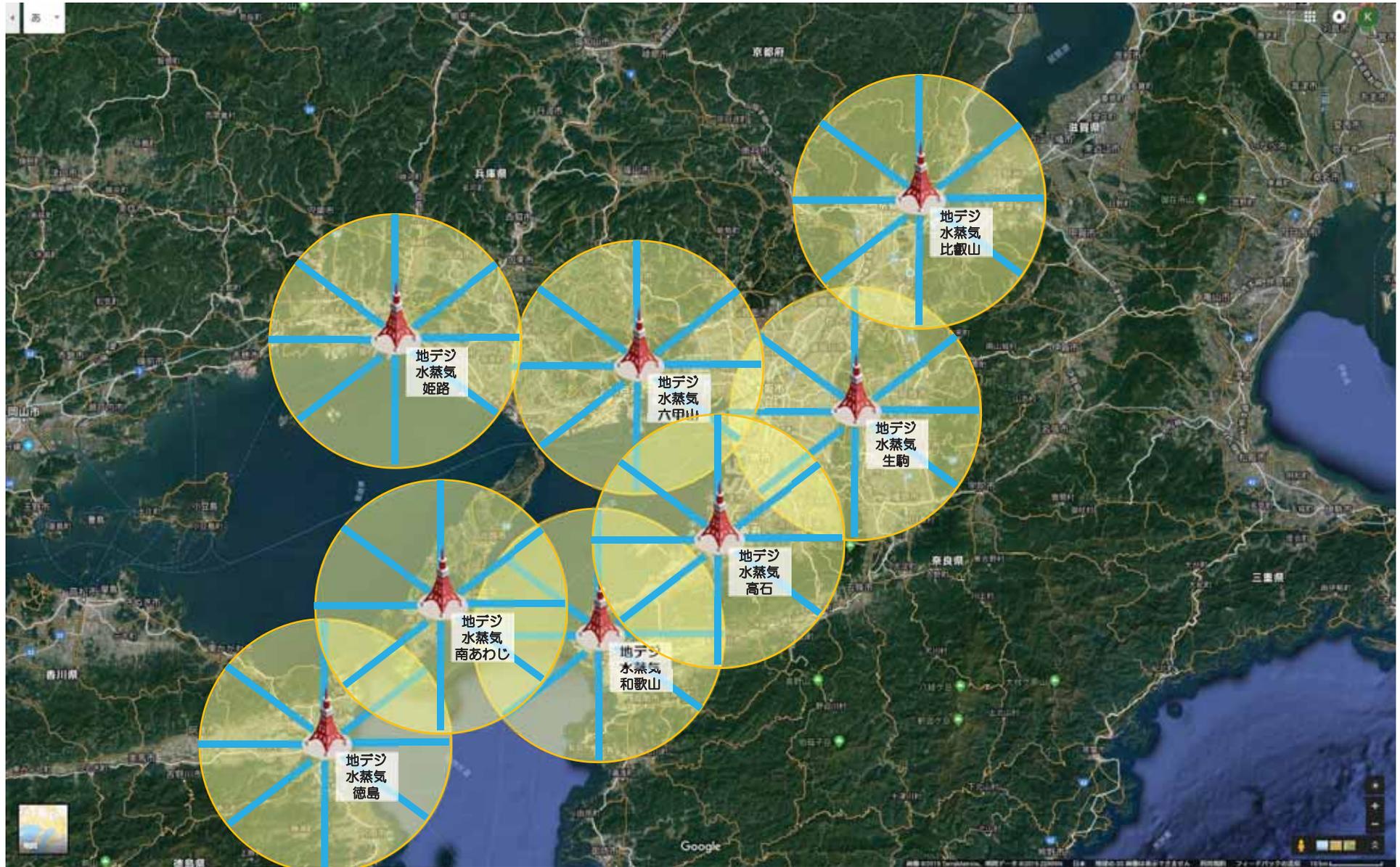
地上デジタル放送波を利用した大気下層の水蒸気量推定

地デジ水蒸気：地表面付近の水蒸気観測



(山口, 村瀬, 中北, 2021)

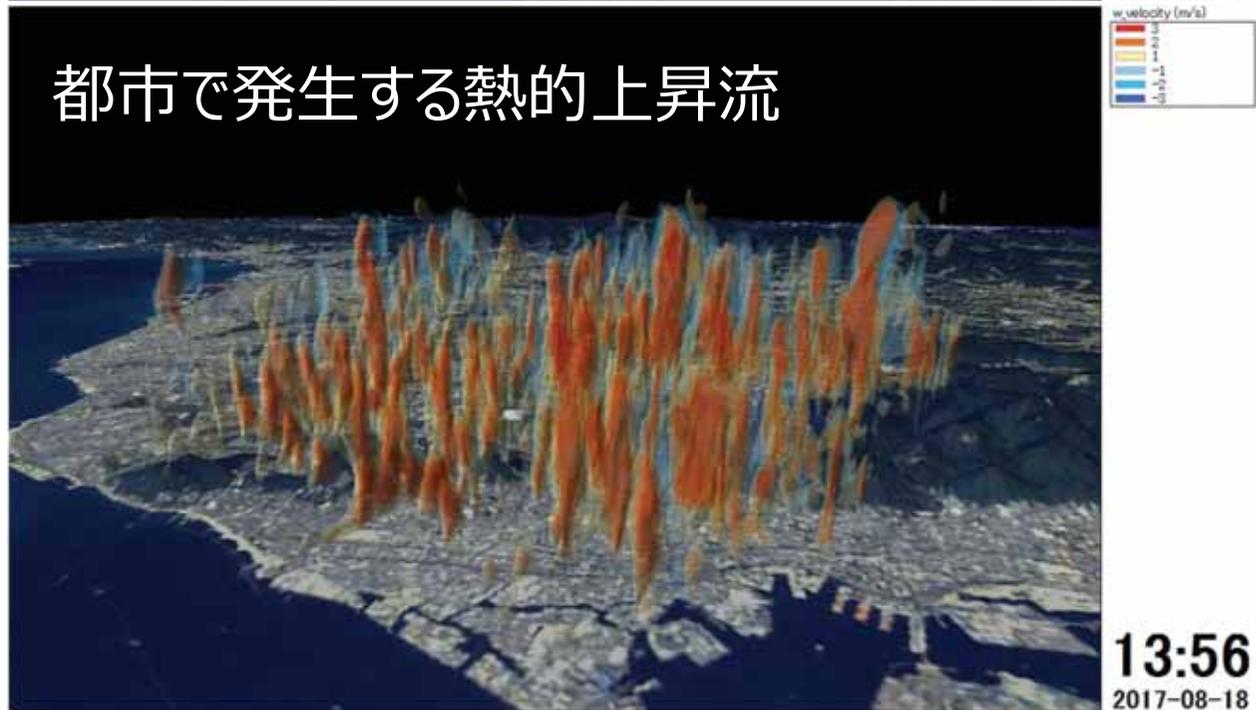
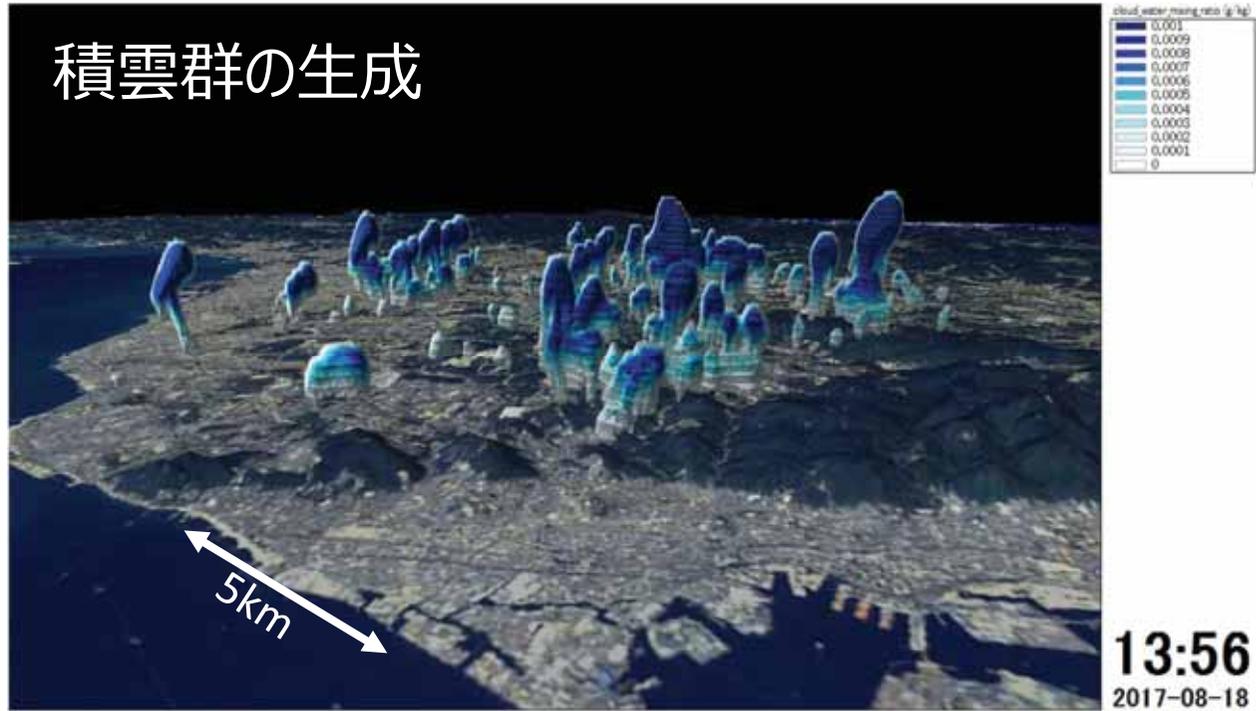
地デジ水蒸気観測 (メソβ~ミクروسケール)



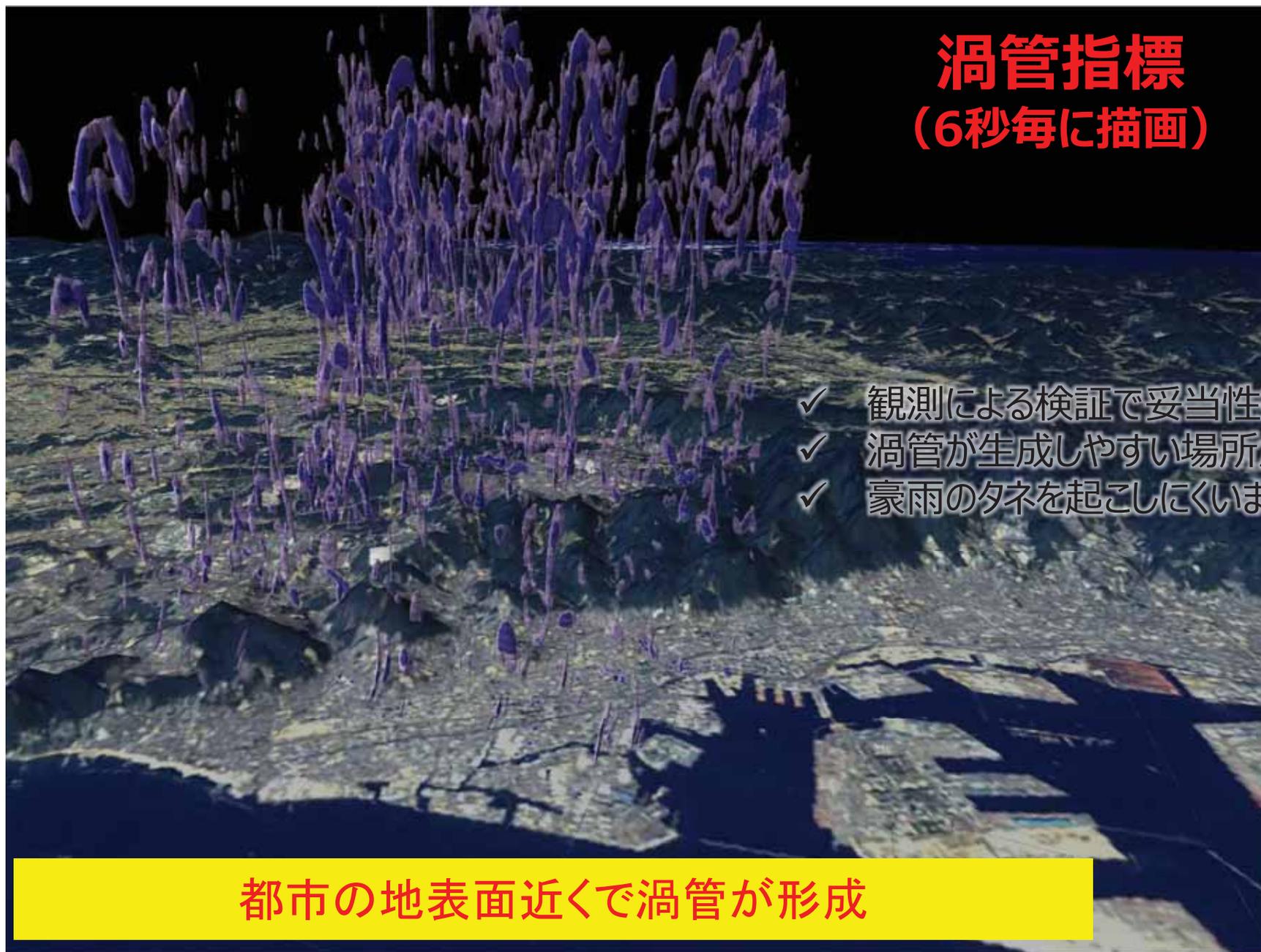
豪雨のタネのシミュレーション



- ✓ 気流の乱れを正確に解くLESモデル
- ✓ 水平60m解像度



豪雨のタネのシミュレーション



1. 発達に関する近年の研究

- ✓ 気象レーダー観測による危険な豪雨のタマゴの探知
- ✓ 雲物理過程の理解の進化とモデル同化予測
- ✓ アンサンブル予測

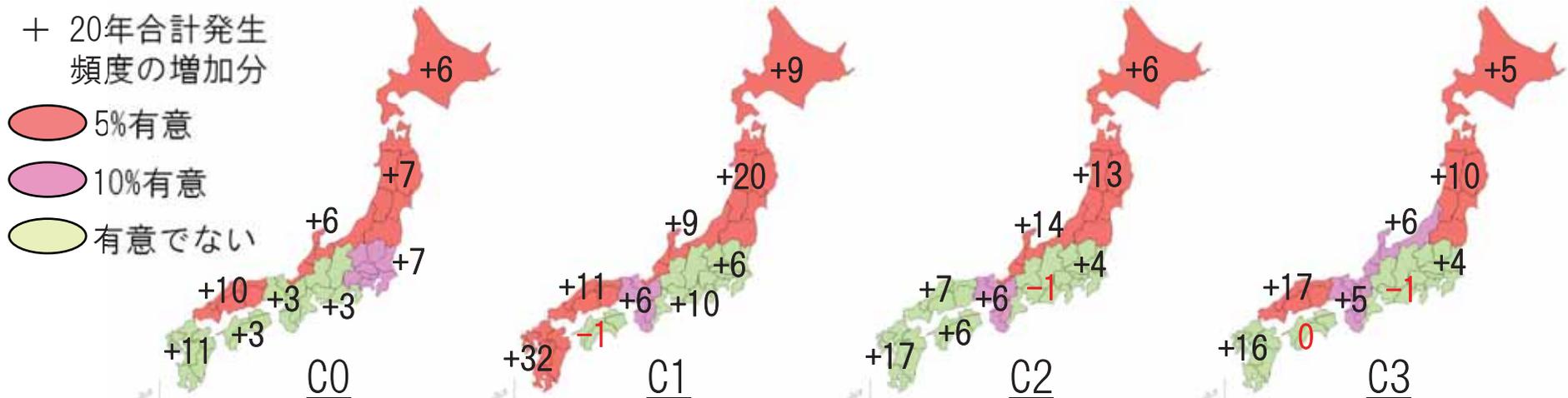
2. 生成に関する近年の研究

- ✓ 時代は、降水だけでなく、降水・雲・水蒸気のステージへ
- ✓ マルチセンサーを用いた観測
- ✓ 都市の熱効果・形状効果を考慮できる数値モデルの開発

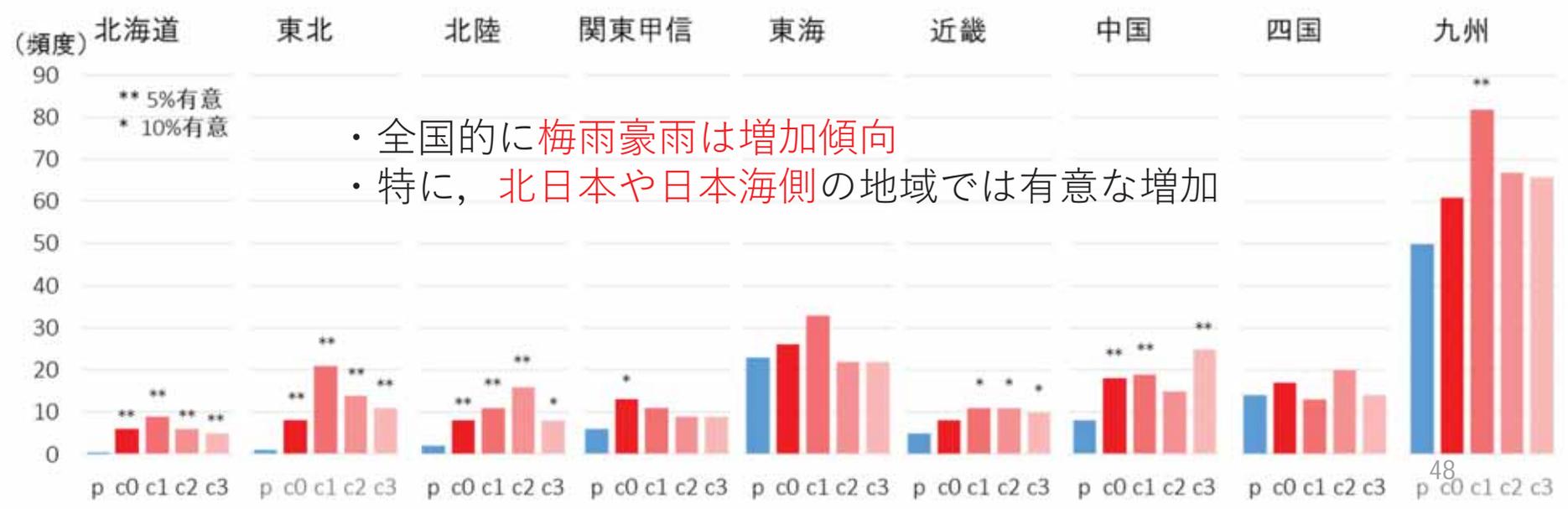
3. 気候変動下における豪雨の将来変化

- ✓ 梅雨豪雨の将来変化

梅雨豪雨発生頻度の将来変化 (地球温暖化時の世紀末のシミュレーション解析)

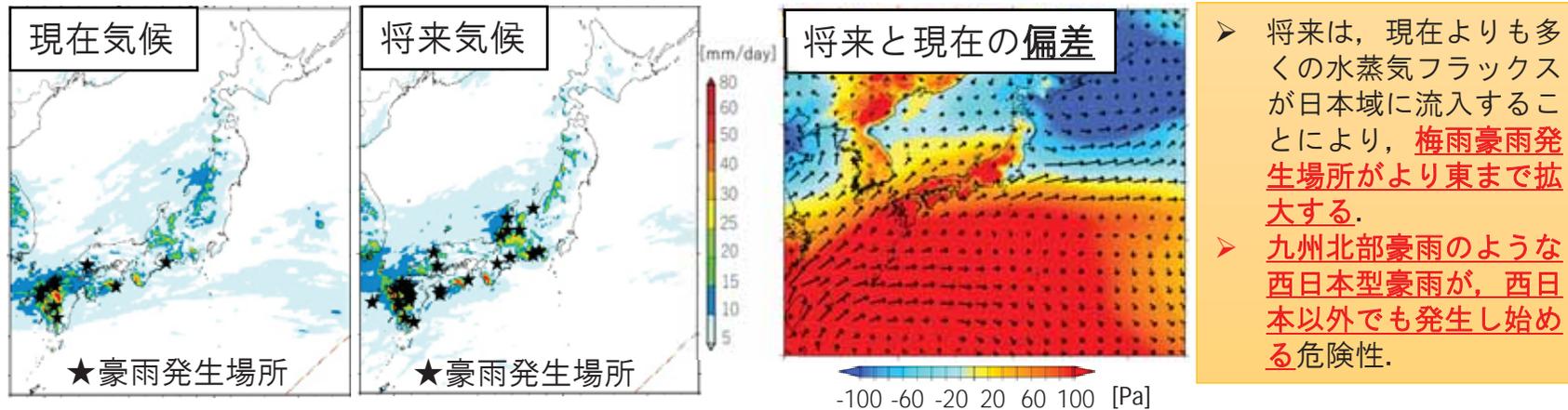


(Osakada and Nakakita, 2018)

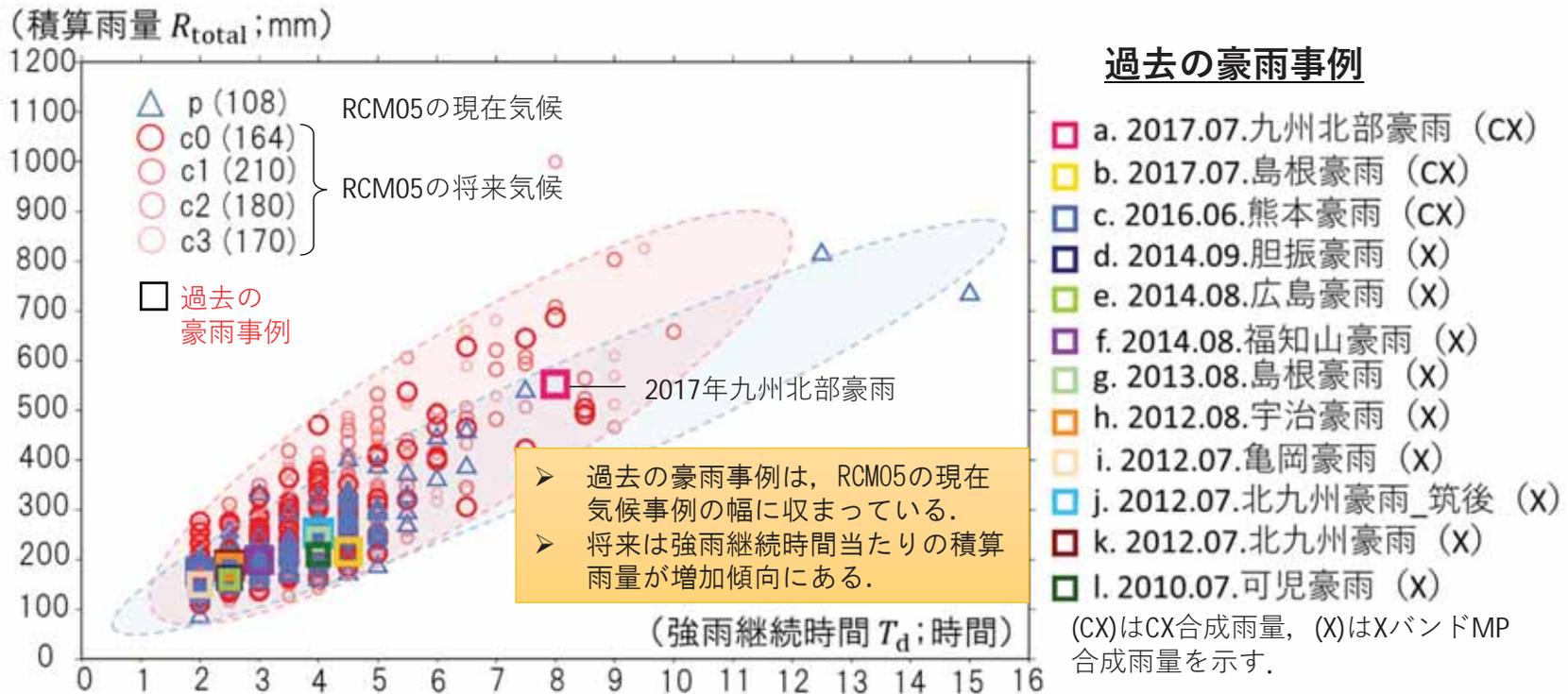


- ・全国的に梅雨豪雨は増加傾向
- ・特に、北日本や日本海側の地域では有意な増加

● 顕著に増加する大気場パターン2における梅雨豪雨発生場所の将来変化



● RCM05及び過去の梅雨豪雨の強雨(50mm/h以上)継続時間と積算雨量



中北・小坂田(2017), 小坂田・中北(2018), Osakada and Nakakita (2018)

まとめ

1. 発達に関する近年の研究

- ✓ 気象レーダー（XRAIN）の気流観測と粒子判別観測によって、豪雨予測精度が向上。
- ✓ リアルタイム監視の上で、重要な情報を提供しているので、3次元化表示や高度な情報を普及できるのではないか。
- ✓ アンサンブル予測を防災情報へ翻訳できつつある。

2. 生成に関する近年の研究

- ✓ 時代は、降水だけでなく、降水・雲・水蒸気のステージへ
- ✓ マルチセンサーを用いた観測で渦がタマゴの生成に重要。
- ✓ 気象にとってのミクロスケールである都市効果はランダムではなく、物理に基づくと言える手前まできている。

3. 気候変動下における豪雨の将来変化

- ✓ 梅雨豪雨の将来変化はじわじわ進んでいる。後悔しない対策が必要。

今後、必要となる研究

- 現状で提供できる情報をいかに可視化・翻訳していくか
- 雲・水蒸気のリアルタイム監視網の整備につながる研究
（「豪雨のタマゴ」⇒「豪雨のタネ」）
- アンサンブル予測を幅を超える特異現象の予測手法の開発
- 詳細数値モデルと現業数値モデルのギャップを埋める研究