豪雨予報における高密度・高頻度地上観測データ同化のインパクト

CPS/WTKセミナー

2019. 8. 26

前島 康光 (理化学研究所・計算科学研究センター)

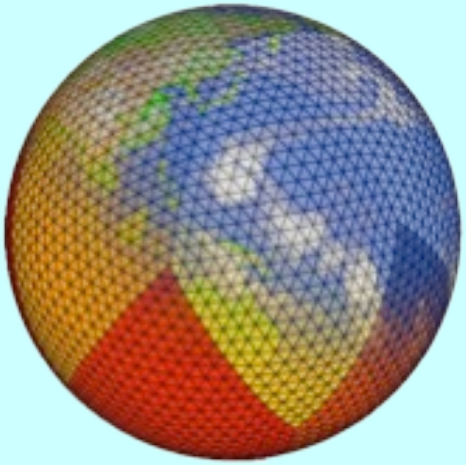
yasumitsu.maejima@riken.jp

データ同化

観測 ·実験データ

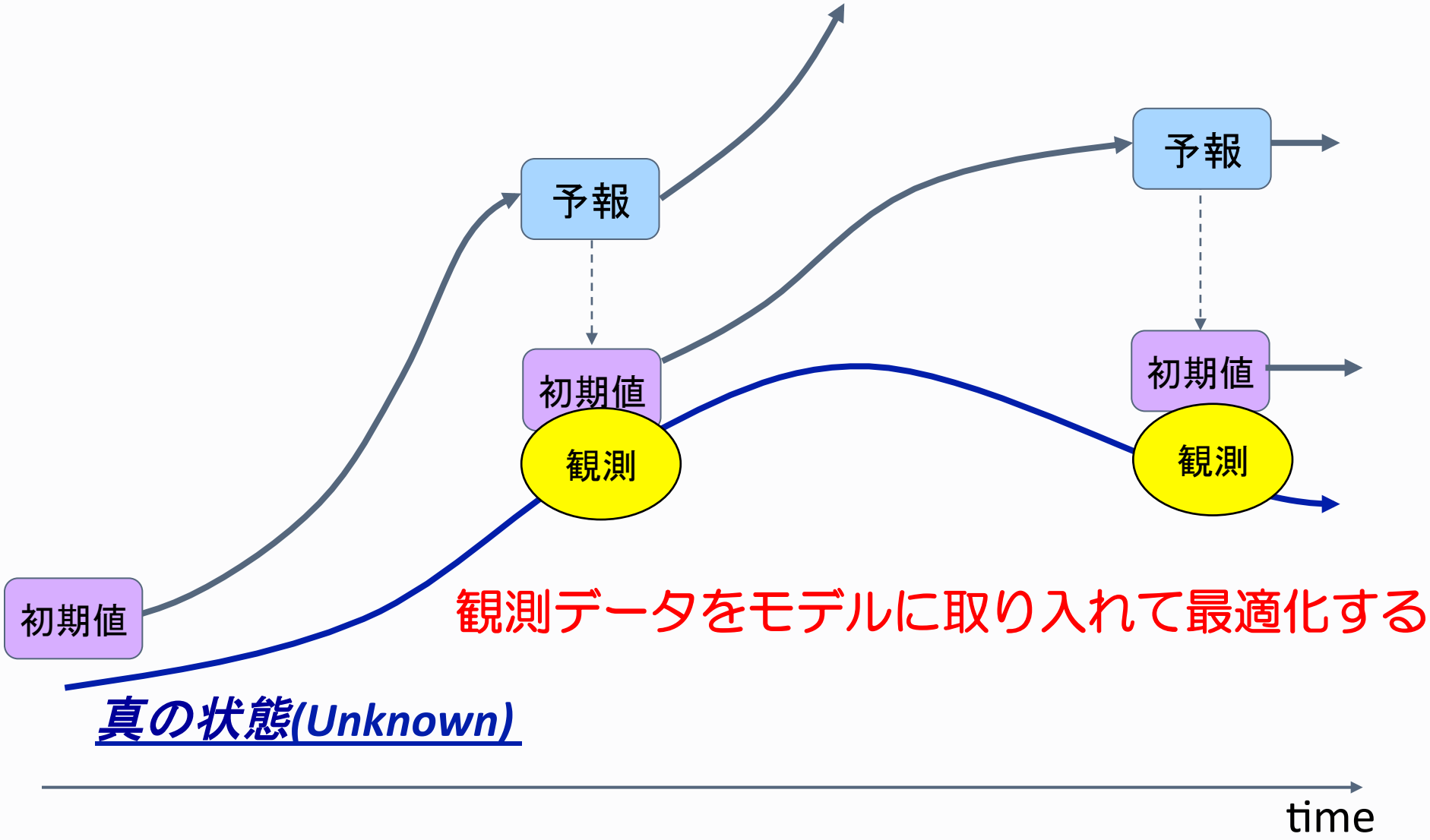
シミュレーション

データ同化



シミュレーションと現実世界(観測)を結びつけ
相乗効果を生み出す

データ同化のイメージ


予報
予報
初期値
観測
初期値
観測
初期値
観測データをモデルに取り入れて最適化する
真の状態(Unknown)
time

カルマンフィルターを用いたデータ同化の概要

Step 2:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_f\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_f\mathbf{H}\mathbf{T}+\mathbf{R})^{-1}$$

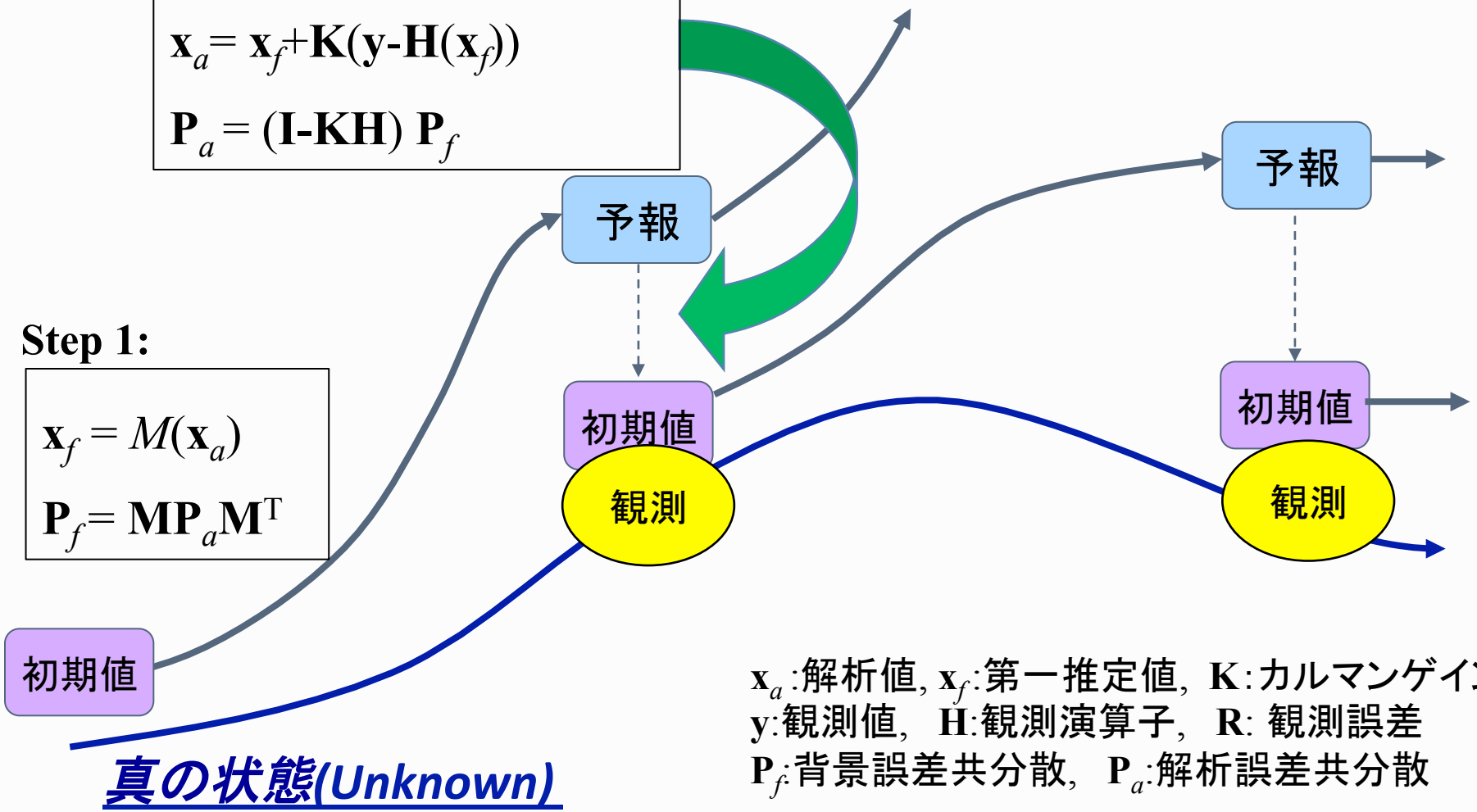
$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}(\mathbf{y}-\mathbf{H}(\mathbf{x}_f))$$

$$\mathbf{P}_a = (\mathbf{I}-\mathbf{K}\mathbf{H})\,\mathbf{P}_f$$

Step 1:

$$\mathbf{x}_f = M(\mathbf{x}_a)$$

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{M}\mathbf{P}_a\mathbf{M}^T$$



$\mathbf{x}_a$:解析値, $\mathbf{x}_f$:第一推定値, $\mathbf{K}$:カルマンゲイン
$\mathbf{y}$:観測値, $\mathbf{H}$:観測演算子, $\mathbf{R}$: 観測誤差
$\mathbf{P}_f$:背景誤差共分散, $\mathbf{P}_a$:解析誤差共分散

カルマンフィルターの落とし穴

Step 1:

$$\mathbf{x}_f = M(\mathbf{x}_a)$$ ← モデルの時間発展

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{M}\mathbf{P}_a\mathbf{M}^{\mathrm{T}}$$ ← 背景誤差共分散行列の推定

- カルマンフィルター(Kalman 1960)は元々線形モデルに対する同化手法
- 非線形モデルに適用する際は、線形化したモデル(**M**)を使って$\mathbf{P}_f$を推定する。
  ⇒ Extended Kalman Filter (EKF)

Step 2:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_f\mathbf{H}^{\mathrm{T}}\,(\mathbf{H}\mathbf{P}_f\mathbf{HT}+\mathbf{R})^{-1}$$ ← カルマンゲインK(混ぜる割合)を決める

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}(\mathbf{y}-\mathbf{H}(\mathbf{x}_f))$$ ← Kを用いてモデル予報値と観測値を混ぜる

$$\mathbf{P}_a = (\mathbf{I}-\mathbf{KH})\,\mathbf{P}_f$$ ← Kを用いて解析誤差共分散を推定

$\mathbf{P}_f$の次元 = モデルの自由度 > $O(10^7)$

(モデル格子点×予報変数)

計算が終わらない!!

$\mathbf{x}_a$:解析値, $\mathbf{x}_f$:第一推定値, **K**:カルマンゲイン
y:観測値, **H**:観測演算子, **R**: 観測誤差
$\mathbf{P}_f$:背景誤差共分散, $\mathbf{P}_a$:解析誤差共分散

アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_f\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_f\mathbf{H}\mathbf{T}+\mathbf{R})^{-1}$$

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}(\mathbf{y}-\mathbf{H}(\mathbf{x}_f))$$

$$\mathbf{P}_a = (\mathbf{I}-\mathbf{K}\mathbf{H})\,\mathbf{P}_f$$

$\mathbf{x}_a$:解析値, $\mathbf{x}_f$:第一推定値, $\mathbf{K}$:カルマンゲイン
$\mathbf{y}$:観測値, $\mathbf{H}$:観測演算子, $\mathbf{R}$: 観測誤差

EnKFでは$\mathbf{P}_f$をアンサンブル予報摂動(アンサンブル平均からの差)$\mathbf{X}_f$で近似する。

$$\mathbf{P}_f \sim \mathbf{X}_f\mathbf{X}_f^T/(m-1), \quad \mathbf{P}_a \sim \mathbf{X}_a\mathbf{X}_a^T/(m-1)$$

m:メンバー数

$\mathbf{X}_f$= −(■xf(1)@xf(2) @■:@xf(m−1)@xf(m)) $\mathbf{X}_a$= (■xa(1)@xa(2) @■:@xa(m−1)@xa(m

$\mathbf{x}_f$ $\mathbf{x}_a$

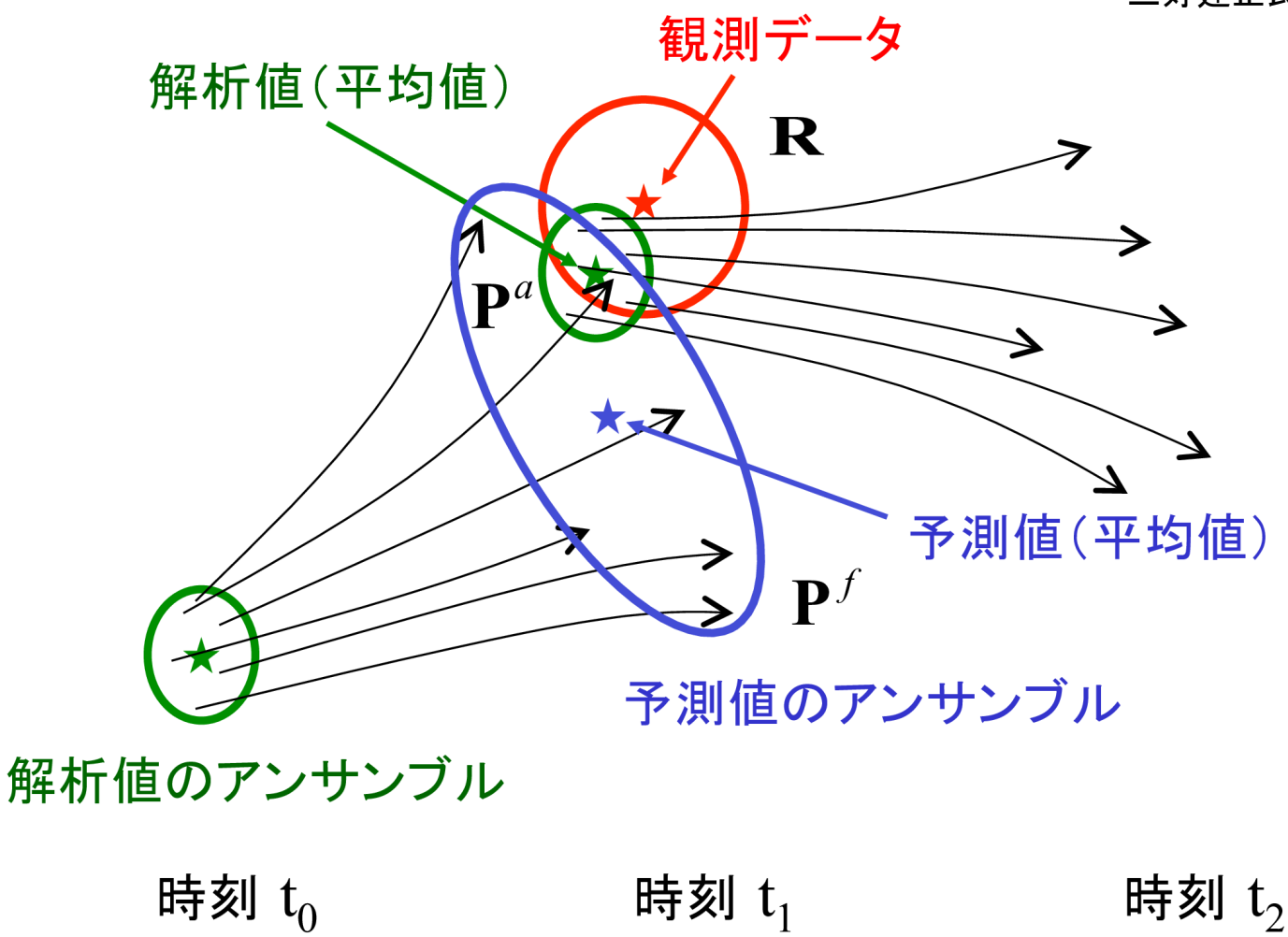
$\mathbf{P}_f$:背景誤差共分散, $\mathbf{P}_a$:解析誤差共分散

$\mathbf{x}_a$のアップデート、$\mathbf{X}_f$から$\mathbf{X}_a$にアップデートする方法にはいくつか種類がある。

(Whitaker and Hamill (2002), Tippett et al. (2003), Evansen (2003), Hunt et al. (2008) など)

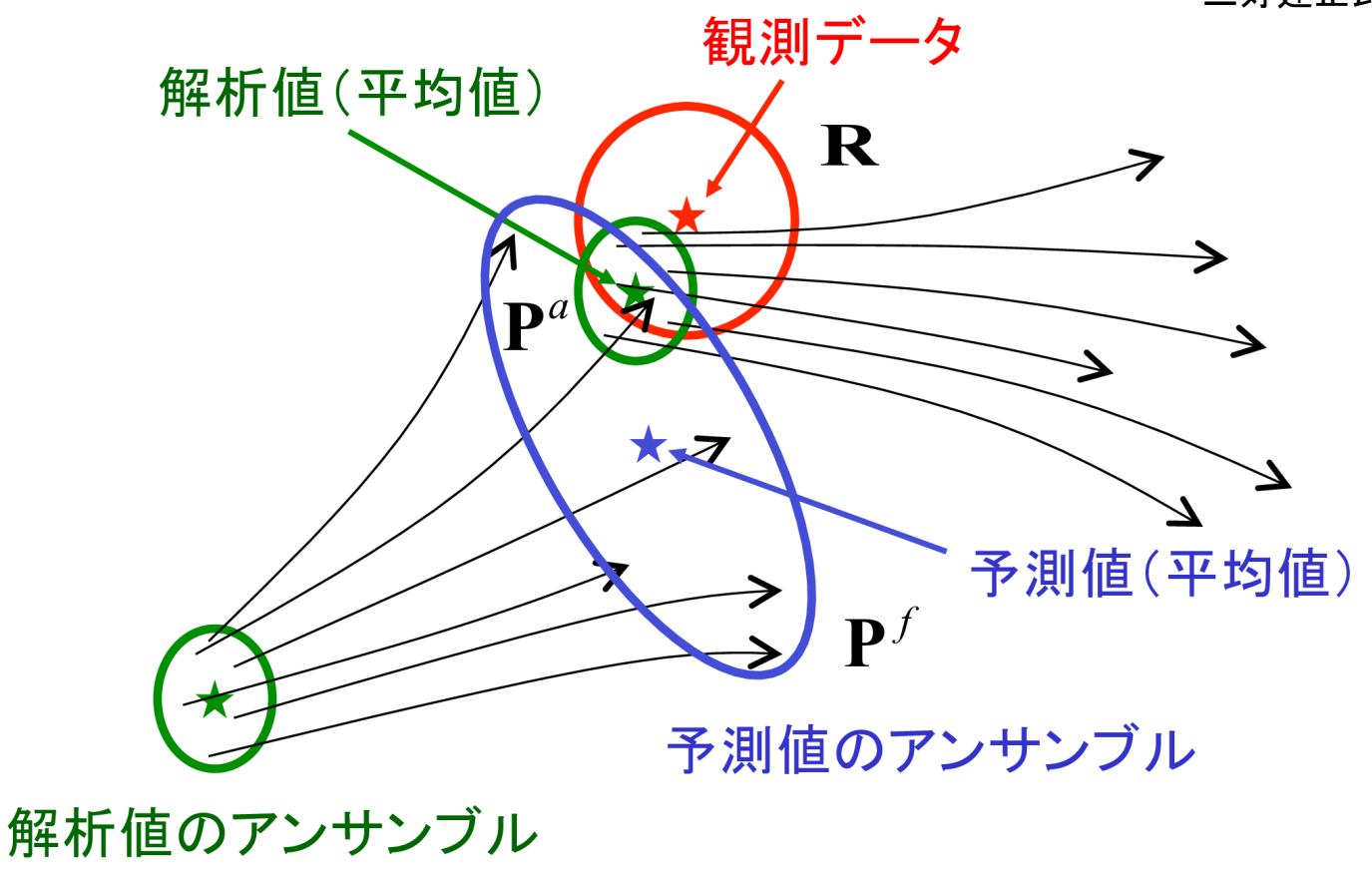
アンサンブルカルマンフィルタの概念図

三好建正氏の図を一部改変



アンサンブルカルマンフィルタの概念図

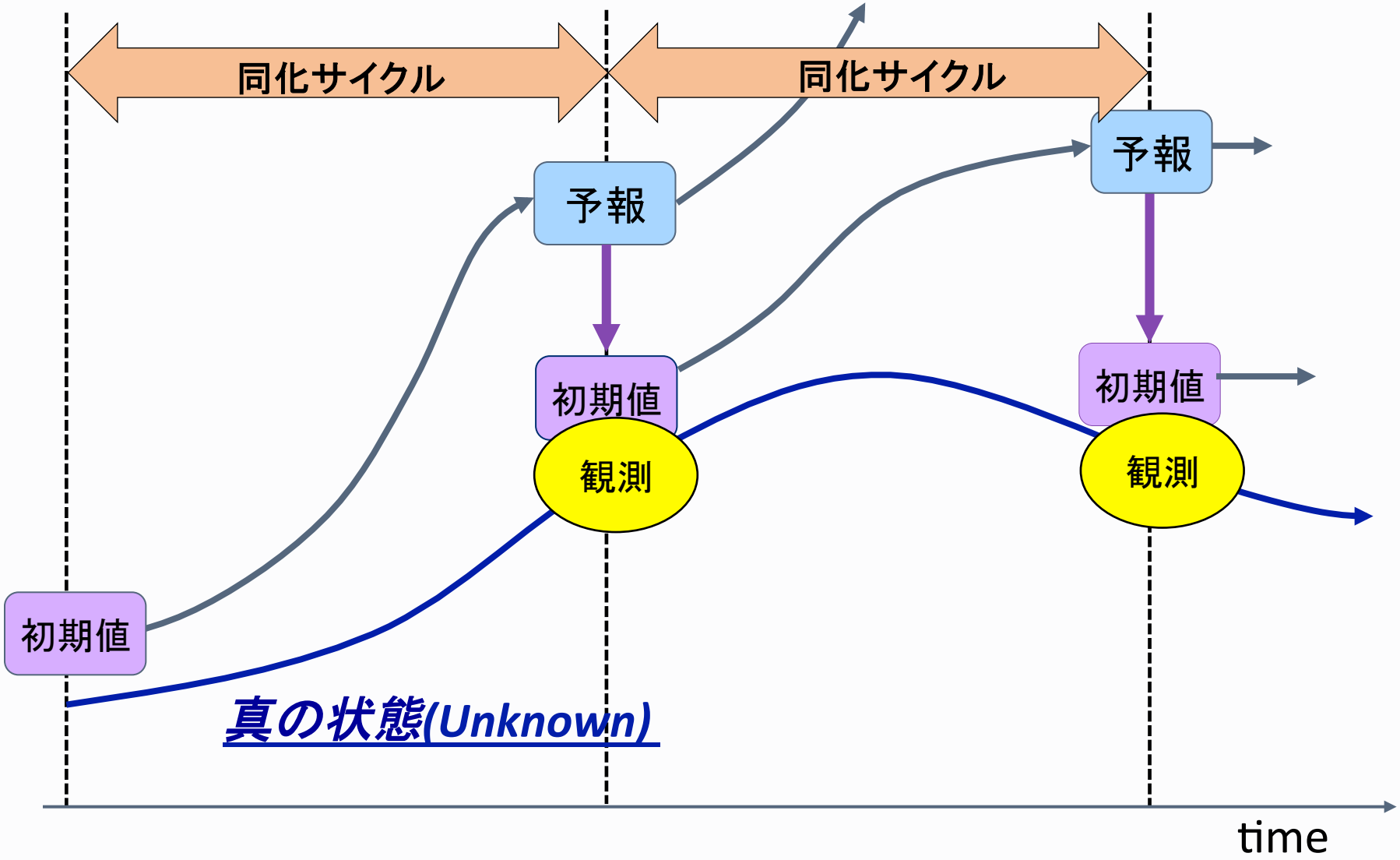
三好建正氏の図を一部改変



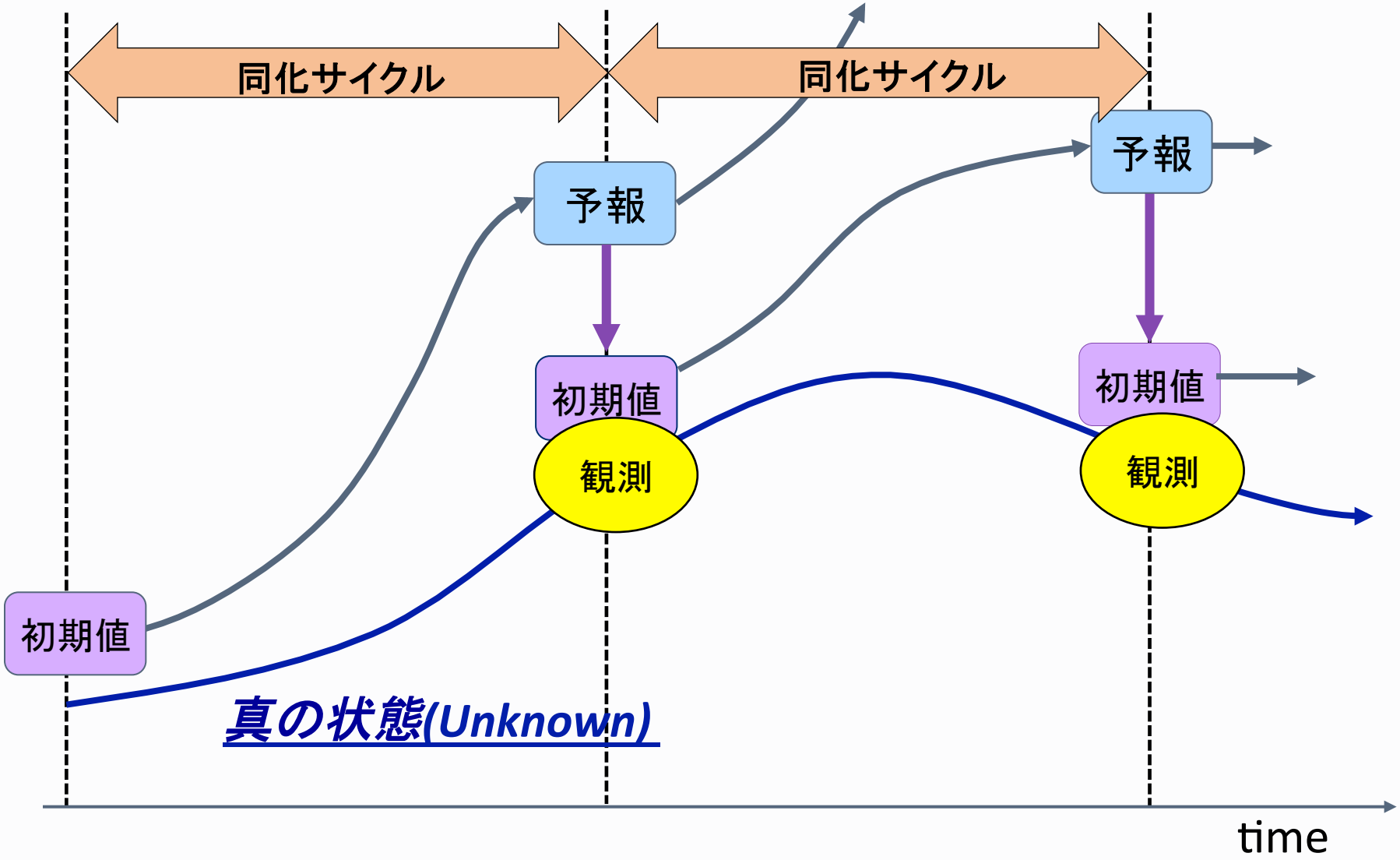
時刻 t_0　　時刻 t_1　　時刻 t_2

アンサンブルメンバー数は多いほど良い ⇔ 計算コストが増加

我々の目標: 100メンバー！！



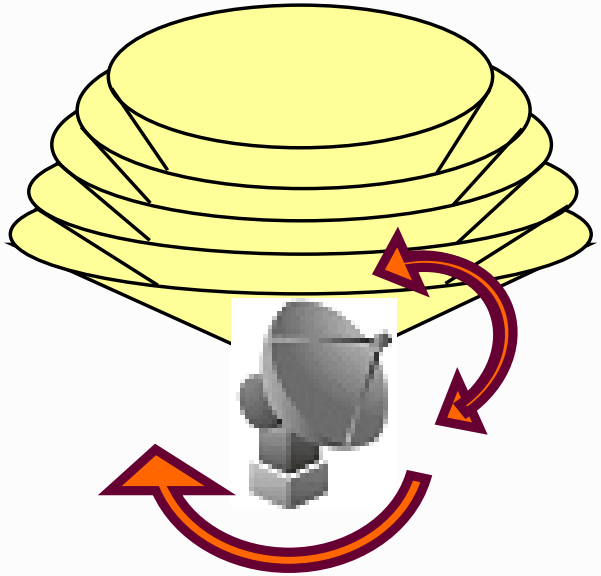
・現業予報システムの同化サイクル： GSM 6時間，MSM 3時間，LFM 1時間
(20kmメッシュ， 5kmメッシュ， 2kmメッシュ)



・現業予報システムの同化サイクル： GSM 6時間, MSM 3時間, LFM 1時間
(20kmメッシュ, 5kmメッシュ, 2kmメッシュ)

我々の目標: 100mメッシュ, 30秒サイクル！！

フェーズドアレイ気象レーダー(PAWR)



（NICTより）

パラボラアンテナによる
3次元立体観測（5～10分）

～15仰角
1回の観測データ～1.5MB

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）

100仰角
1回の観測データ～1GB

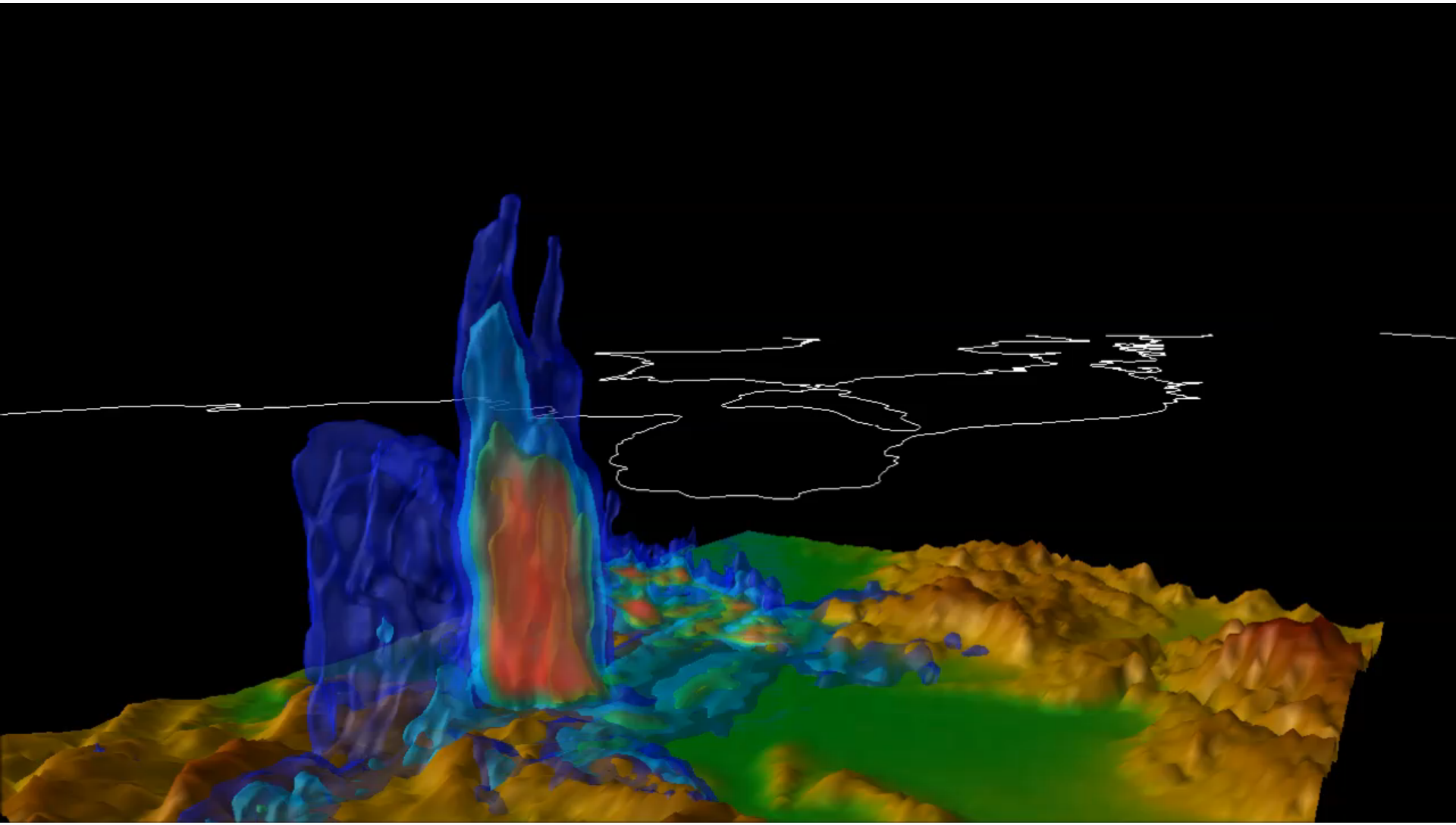
観測される量

反射強度：降水粒子によって反射される電波のエネルギー

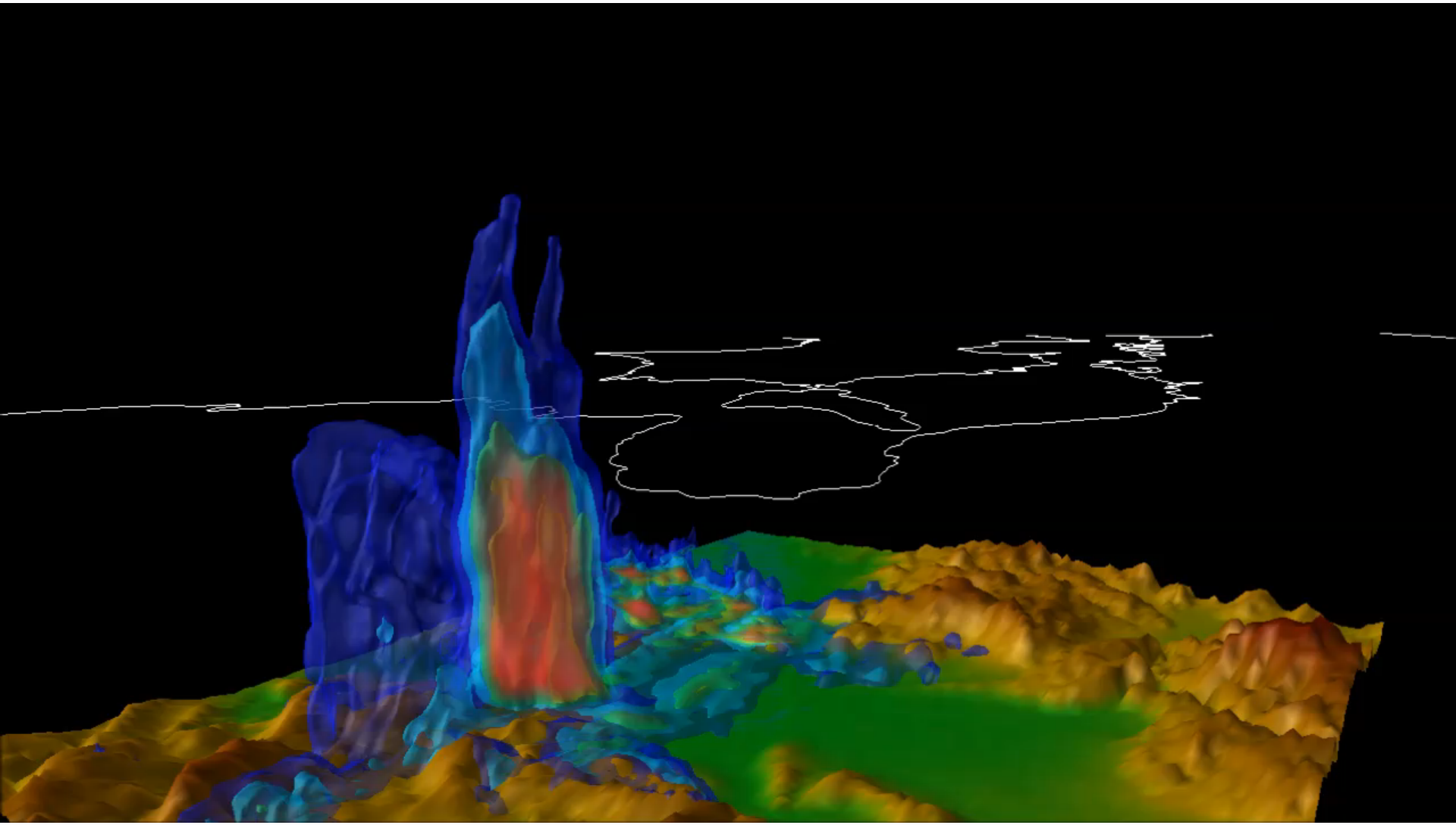
動径風：反射波の周波数からドップラー効果によって割り出した風向・風速

- 現在日本では5基が稼働中
  - 阪大吹田キャンパス, NICT神戸, NICT沖縄, 気象研究所(つくば),日清紡HLD(千葉)

従来のレーダー（5分毎）



フェーズドアレイ気象レーダー（30秒毎）



簡易型地上観測測器(POTEKA Ⅱ)の展開

2013年10～2019年3月まで観測を実施

30秒毎にデータを取得

観測量	
風向 [deg]	気温 [℃]
風速 [m/s]	気圧 [hPa]
相対湿度 [%]	感雨 (0 / 1)
日射強度 [W/m^2]	雨量 [mm]

本日の話題

- 稠密な地上観測データを用いた
  観測システムシミュレーション実験
  (2008年7月28日・都賀川水難事故の事例)

- 実地上観測データを用いた局地的豪雨事例の同化実験
  - 2014年9月11日・神戸市付近の局地的豪雨事例
  - POTEKA IIの同化

- 平成27年関東・東北豪雨事例における
  稠密地上観測データ同化実験
  - 2015年9月9日・鬼怒川氾濫事例
  - NTT DoCoMo環境センサーネットワークデータの同化

Part Ⅰ
稠密な地上観測データを用いた観測システムシミュレーション実験
(2008年7月28日・都賀川水難事故の事例)

Maejima et al. 2019; JMSJ

はじめに

(国土交通省 鳥取河川国道事務所のHP　http://www.cgr.mlit.go.jp/tottori/river/suinanboushi.html　より引用)

OSSEとは…　実在しない観測システム(仮想観測システム)を計算機上に構築し，その振る舞いを評価する手法。*(石橋 2013; 天気)*

2008年7月28日に神戸市の都賀川で水難事故を引き起こした局地的大雨を対象とした、観測システムシミュレーション実験（OSSE）を行う。

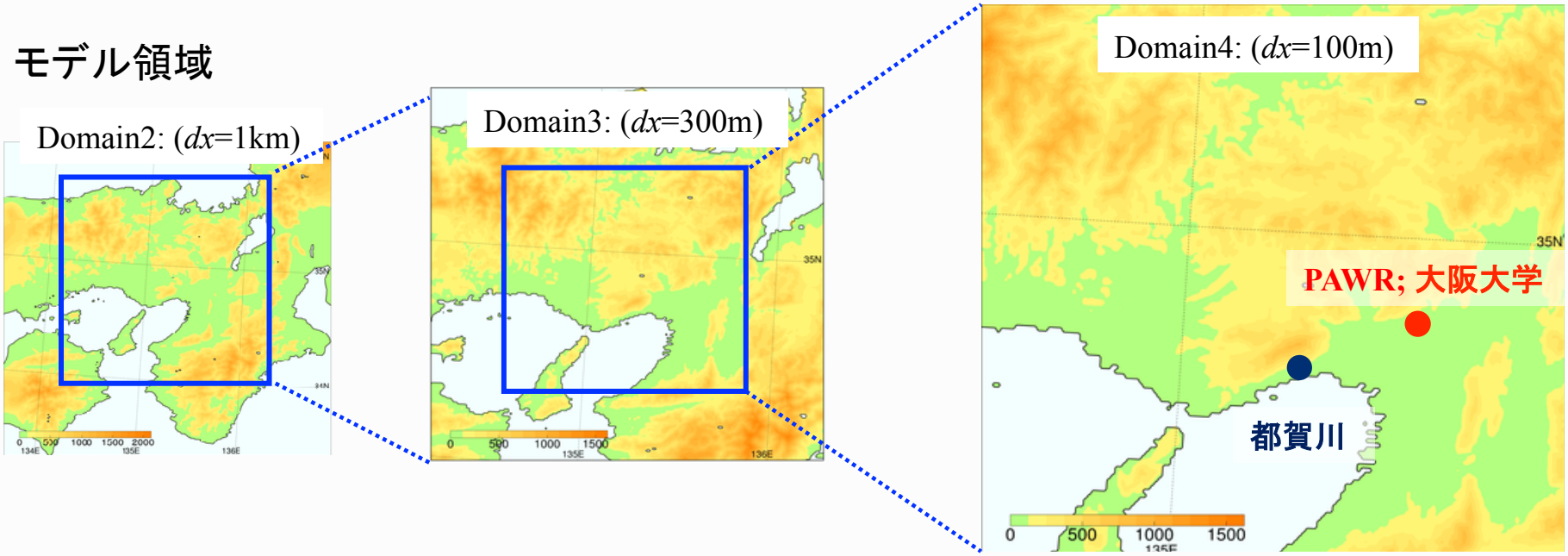
- 気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用いた100mメッシュ予報を真値（Nature run）とする
- 局所アンサンブル変換カルマンフィルター(LETKF)を用いた1kmメッシュのOSSE

高解像度予報実験(Nature Run)の設定

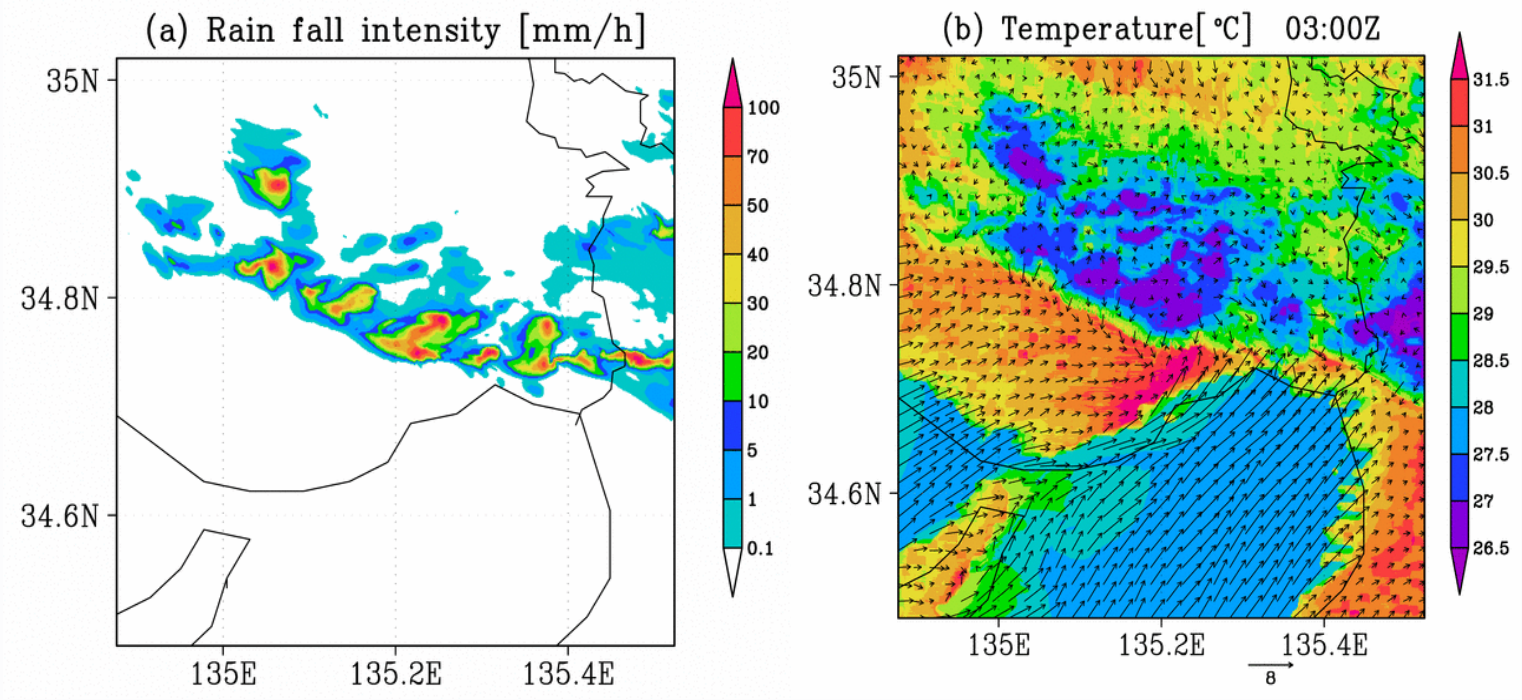
	dx	*dt*	Grids	Initial Time	Turbulence
Domain 1	5 km	24 s	200×200×40	7/28 0000 UTC	MYNN Level3
Domain 2	1 km	10 s	301×301×50	7/28 0000 UTC	MYNN Level3
Domain 3	300m	3 s	641×641×50	7/28 0130 UTC	Deardorff(1973)
Domain 4	100m	0.5 s	1200×1200×60	7/28 0200 UTC	Deardorff(1973)

- Domain1の初期値　：5km解像度、NHM-LETKFのデータ(Seko et al. 2009)
- 雲物理過程　：氷晶3カテゴリーのシングルモーメント（雲氷のみダブルモーメント）
  dx=5kmではKFスキームを併用
- 地形データ　：GTOPO30

モデル領域



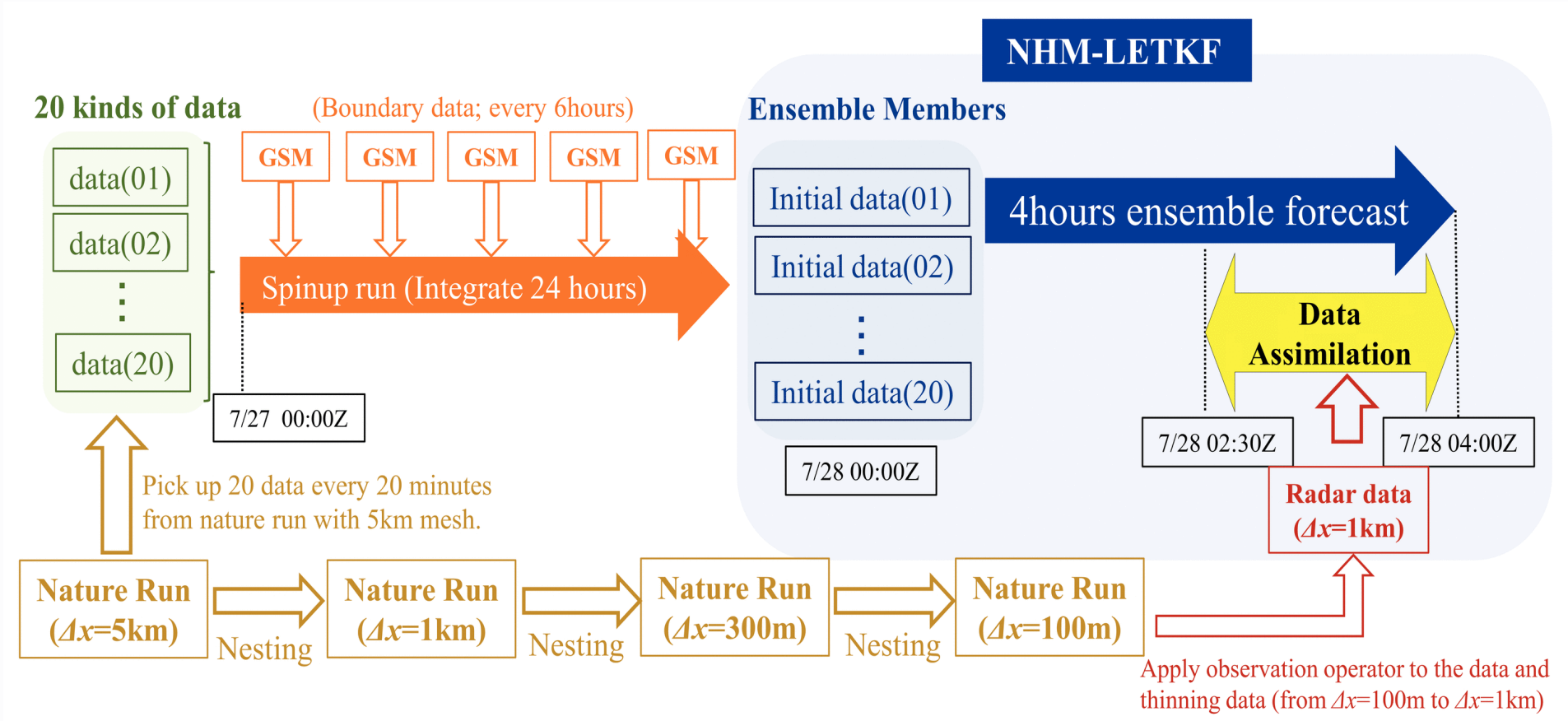
高解像度予報実験
(100m解像度Nature Run)の結果



再現された特徴

- 草開ほか(2011)が指摘した、六甲山北側の大気下層における、コールドプールと発散場の存在。
- 瀬戸内海側から吹き込む南西風と、上記コールドプールによる収束帯の形成。
- 最大で100mm/h以上の強度をもつ降水帯。

観測システムシミュレーション実験の流れ



- NHM解像度　　：水平1km，鉛直50層(40m～904m)
- データ同化サイクル　：1分毎
- 観測データ(PAWR)　：反射強度とドップラー速度(Nature runから模擬)
- 観測誤差 (PAWR)　：反射強度の±10%　(ただし20dBZ未満では一律2dBZ)

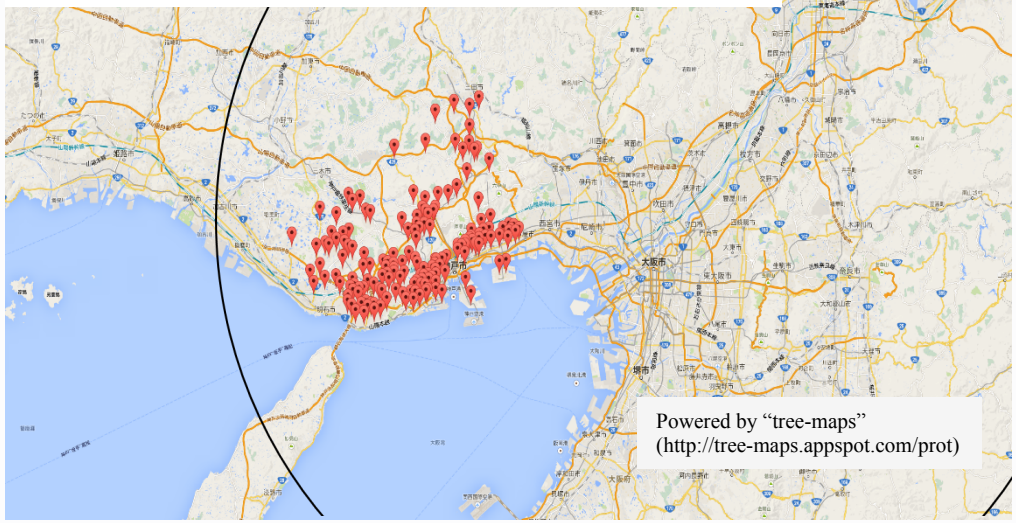
POTEKA Ⅱ

設置されていた **8地点**

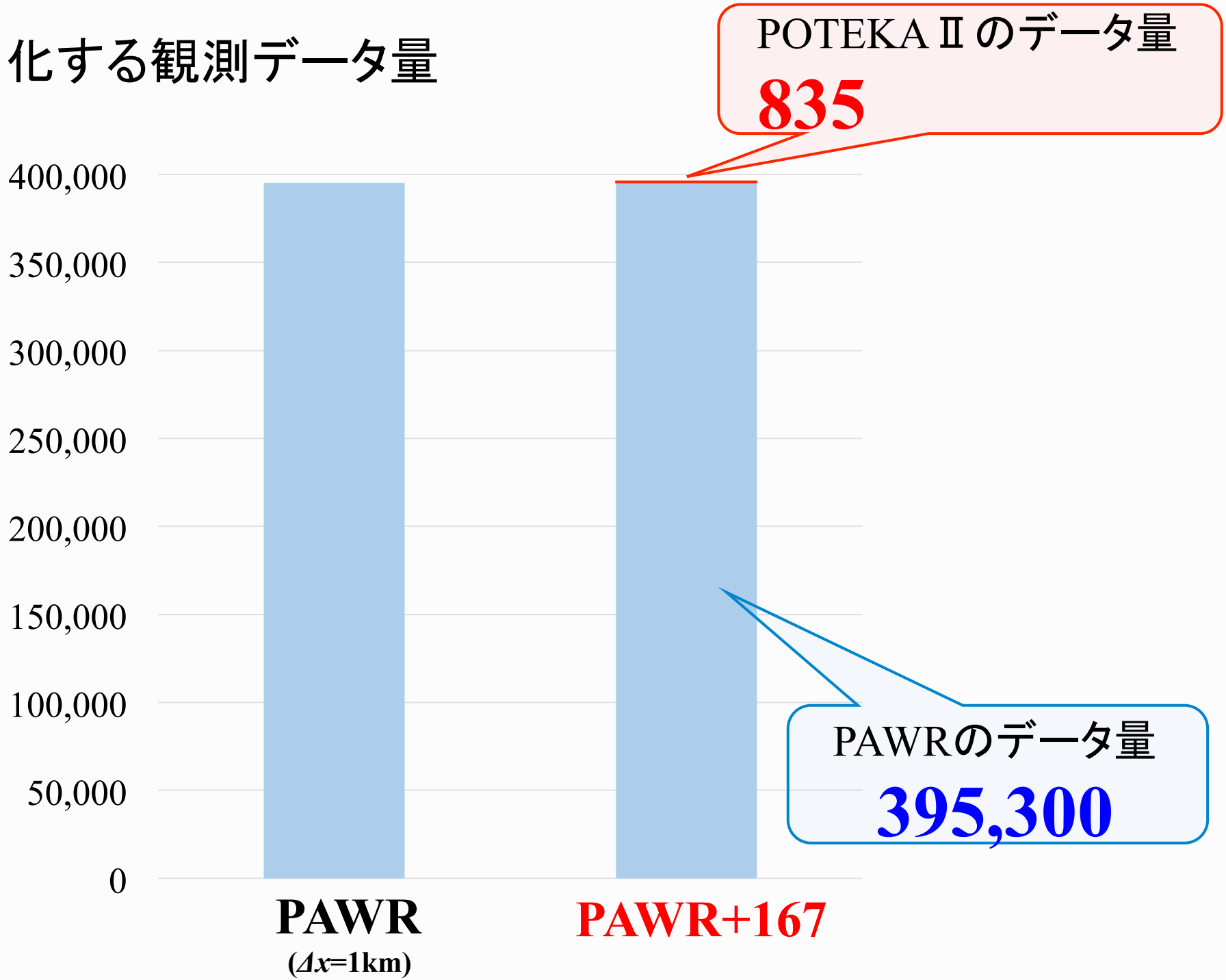
同化の際の観測誤差	
風速 [m/s]	50% (最小2 m/s)
気圧 [hPa]	1 hPa
気温 [℃]	1 K
相対湿度 [%]	10 %

- 地上観測のインパクトを調べる。

神戸市内全小学校+R-CCS **167地点**



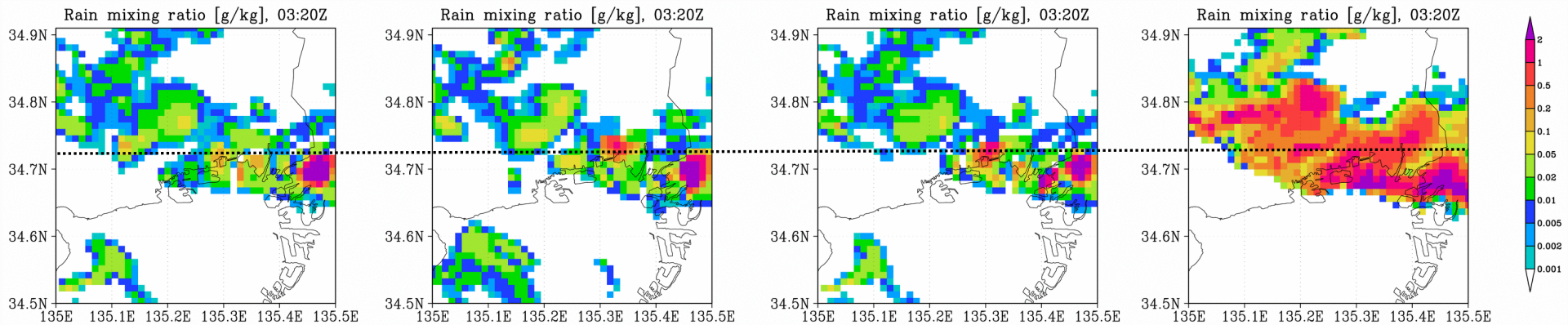
同化する観測データ量


POTEKA Ⅱ のデータ量
835
400,000
350,000
300,000
250,000
200,000
150,000
100,000
50,000
0
PAWRのデータ量
395,300
PAWR
(Δx=1km)
PAWR+167

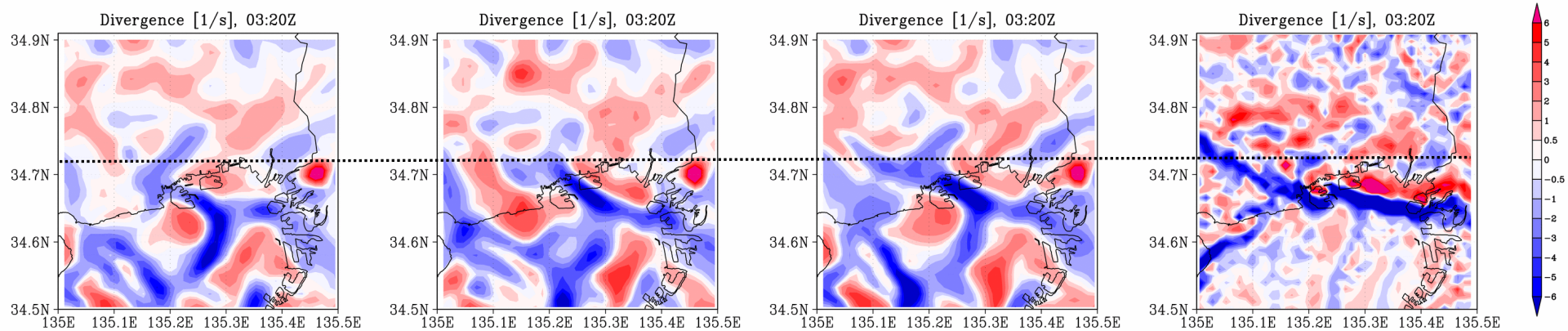
地上観測データ同化のインパクト
2008/07/28 12:20JST (50 同化サイクル後)

地表付近(z*=20m)の雨水混合比 [g kg^{-1}]

(a) PAWR **(b) PAWR+8** **(c) PAWR+167** **(d) Nature run**



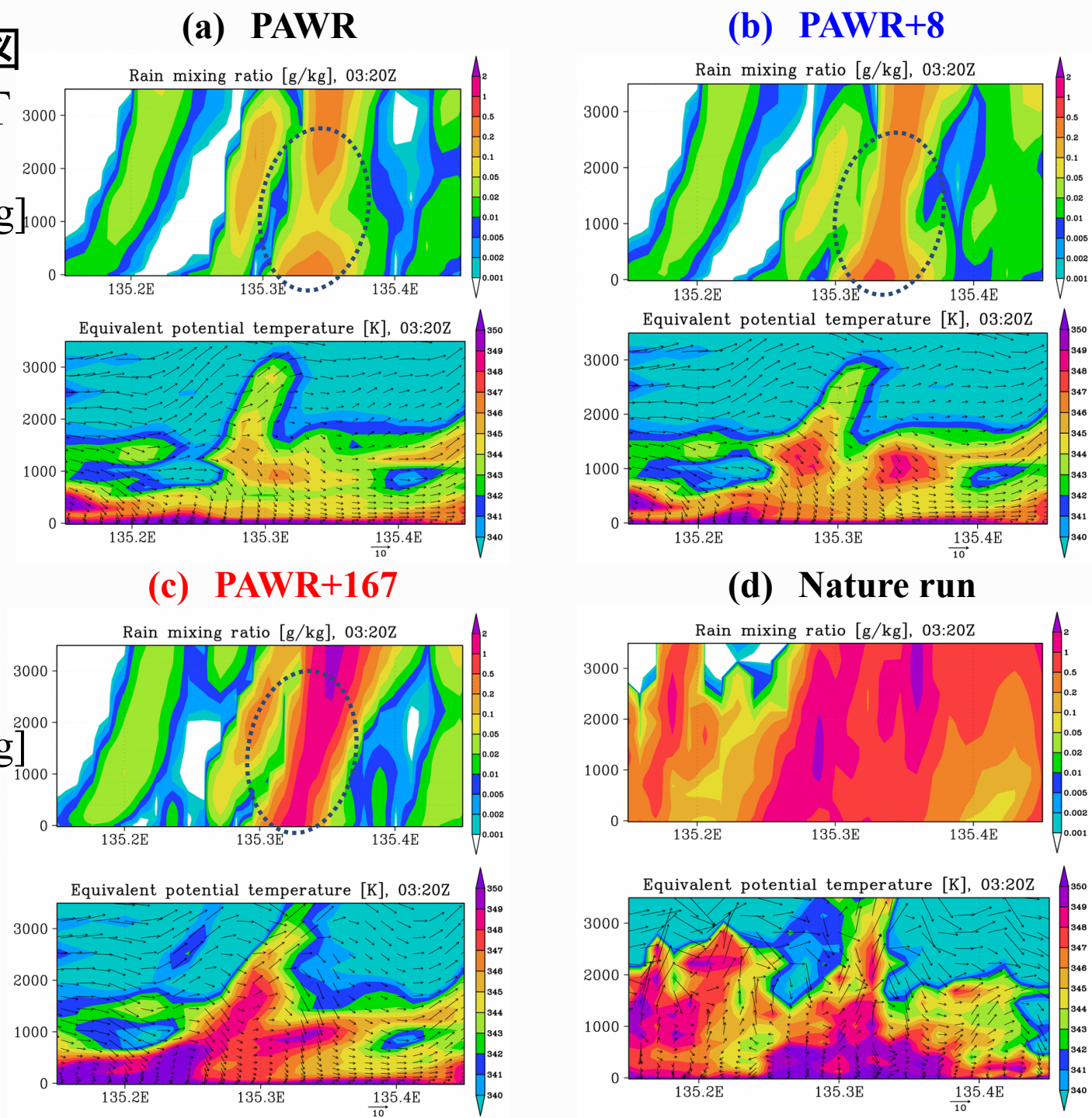
地表付近(z*=20m)の収束発散 [$\times 10^{-3}$s^{-1}]



東西-高度断面図
12:30JST

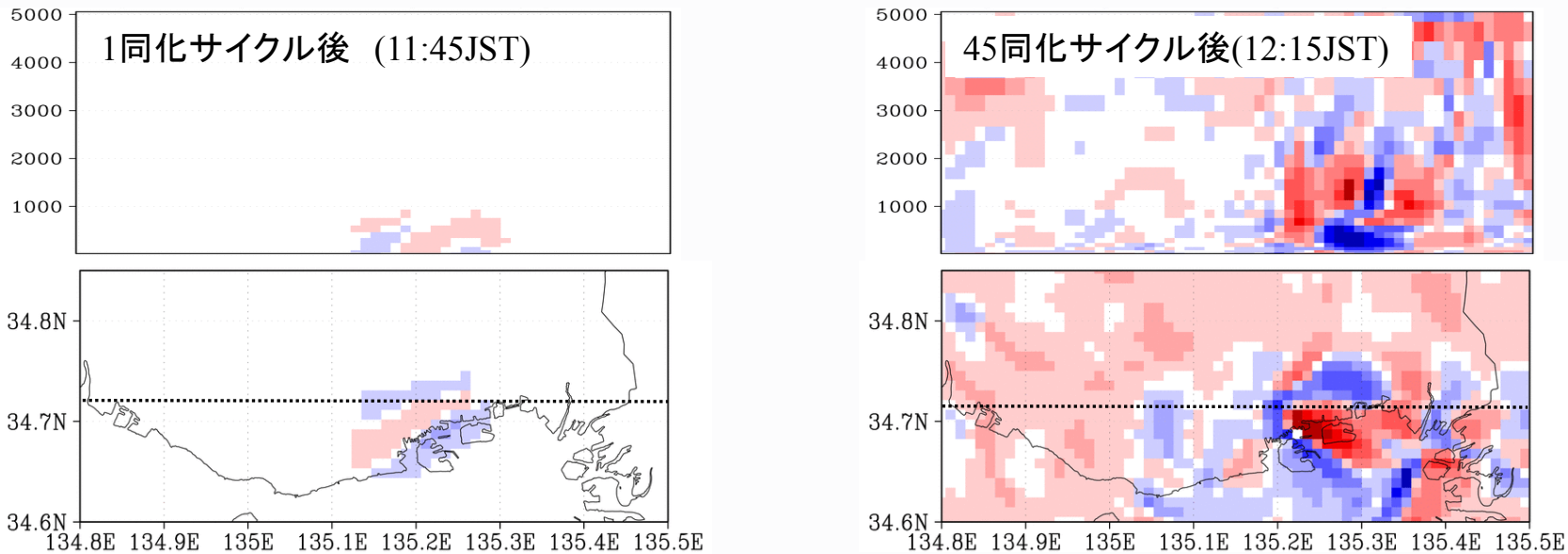
雨水混合比 [g/kg]

相当温位 [K]

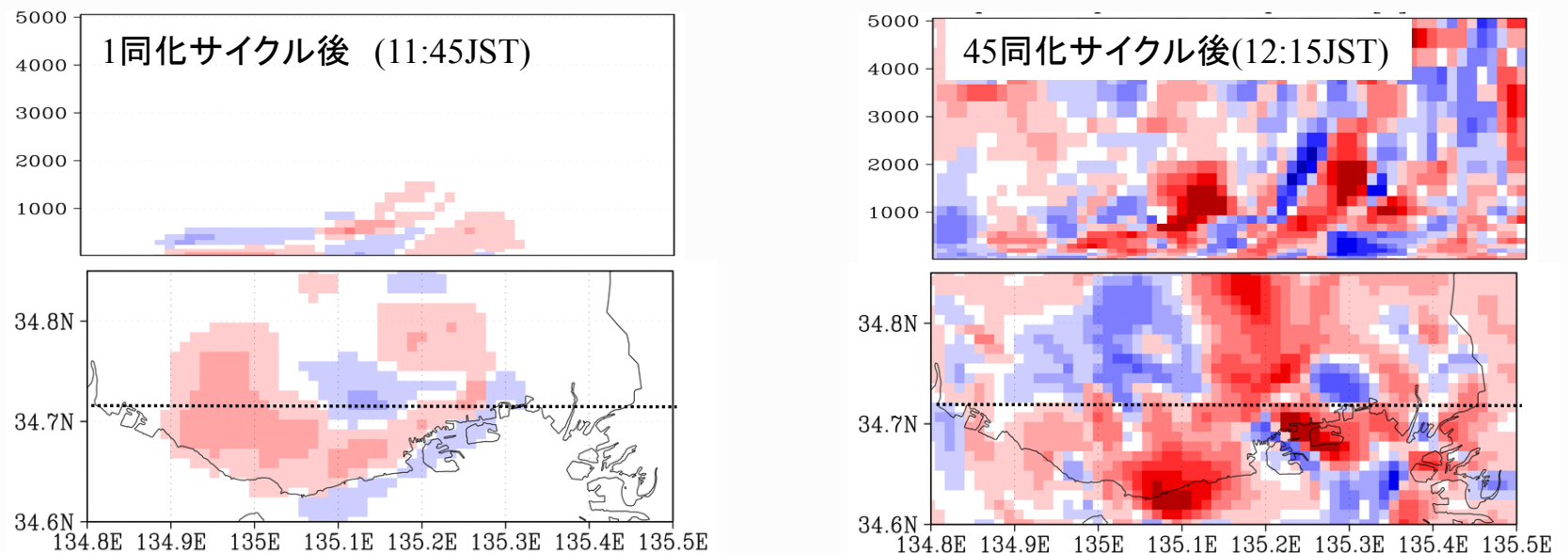


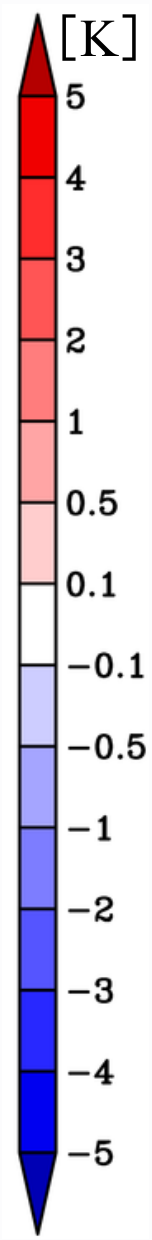
相当温位の差

8地点のPOTEKAを追加

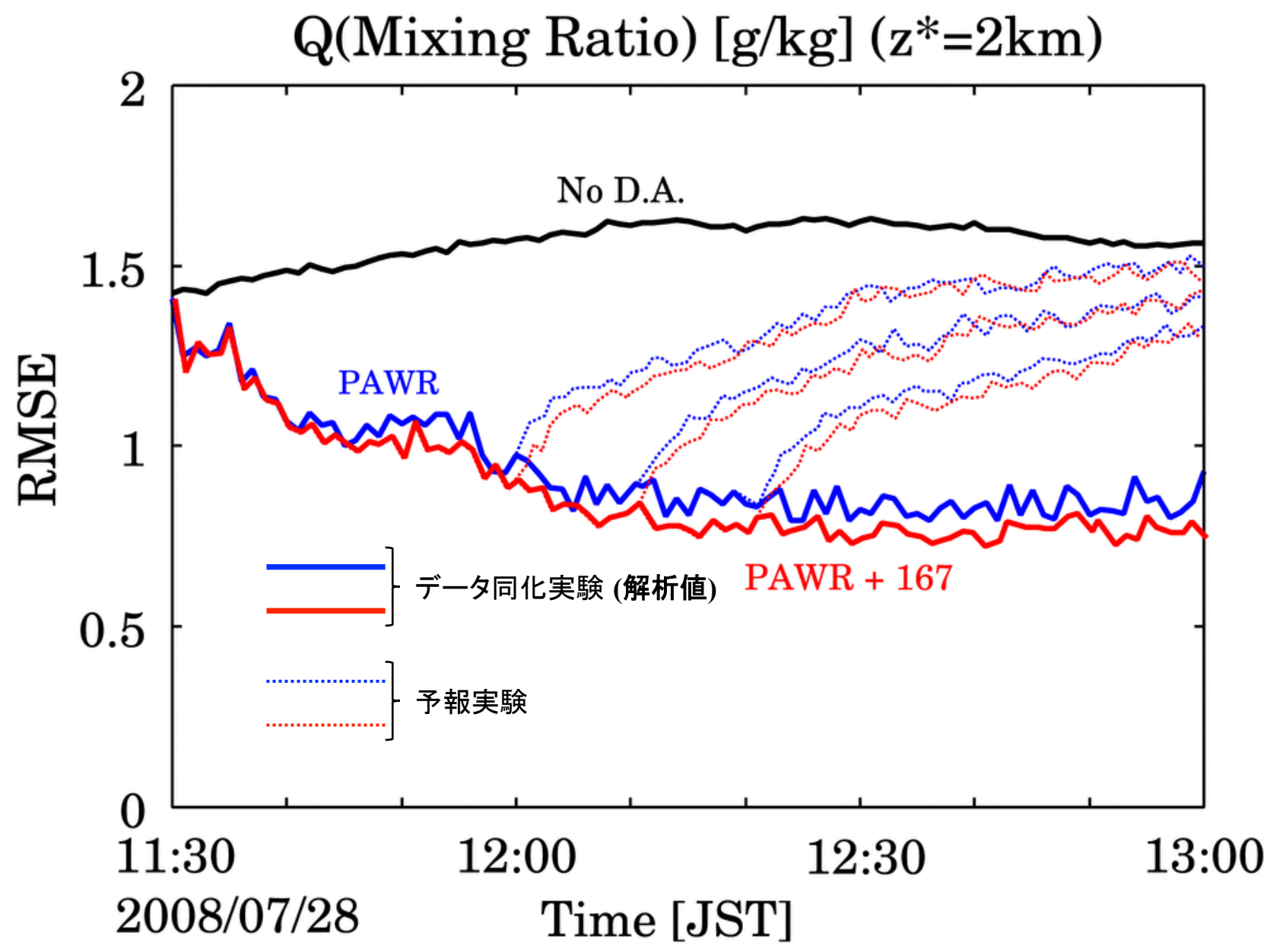


167地点のPOTEKAを追加





RMSEの時間変化


Q(Mixing Ratio) [g/kg] (z*=2km)
RMSE
2
1.5
1
0.5
0
No D.A.
PAWR
PAWR + 167
データ同化実験 (解析値)
予報実験
11:30
12:00
12:30
13:00
2008/07/28
Time [JST]

都賀川事例OSSEのまとめ

- 最新鋭の気象レーダーであるPAWRと、地上観測測器POTEKA Ⅱを想定した、NHM-LETKFによるOSSEを行った。

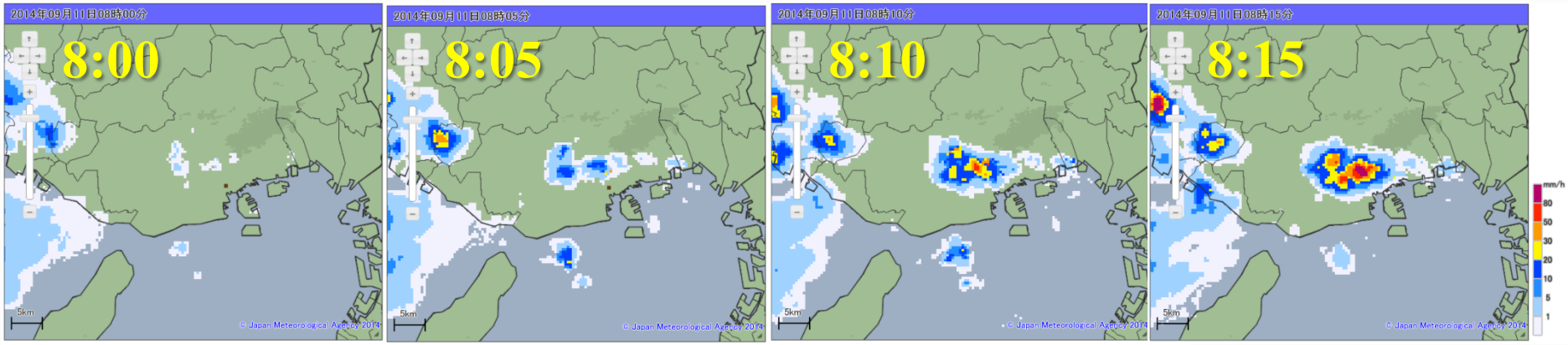
- 神戸市内全小学校にPOTEKA Ⅱを展開した場合を想定したデータを同化することによって、神戸市付近の収束帯、大気下層の水蒸気、対流セルが強化され、地上降水量に改善が見られた。

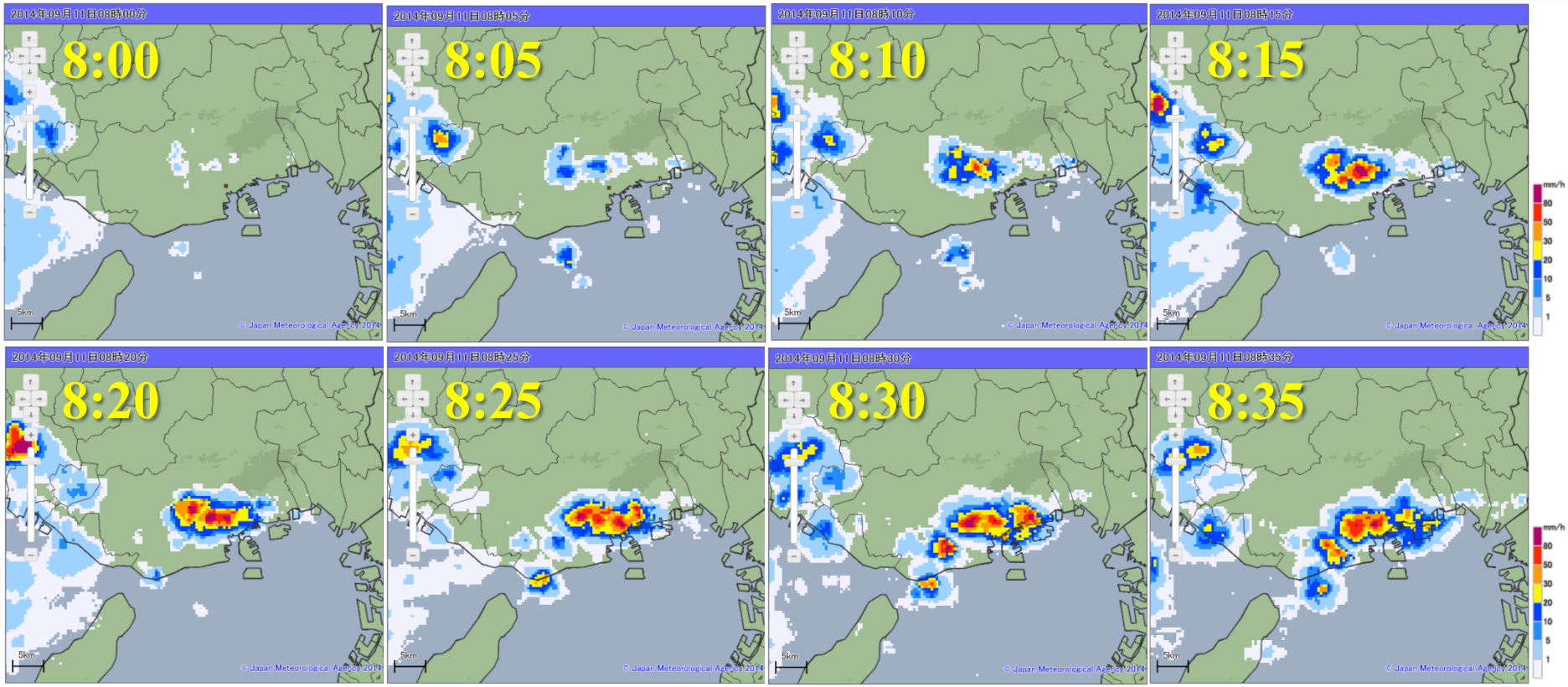
- PAWR, POTEKA Ⅱ両方を同化することで、PAWRのみを同化した場合に比べて予報精度が改善した。

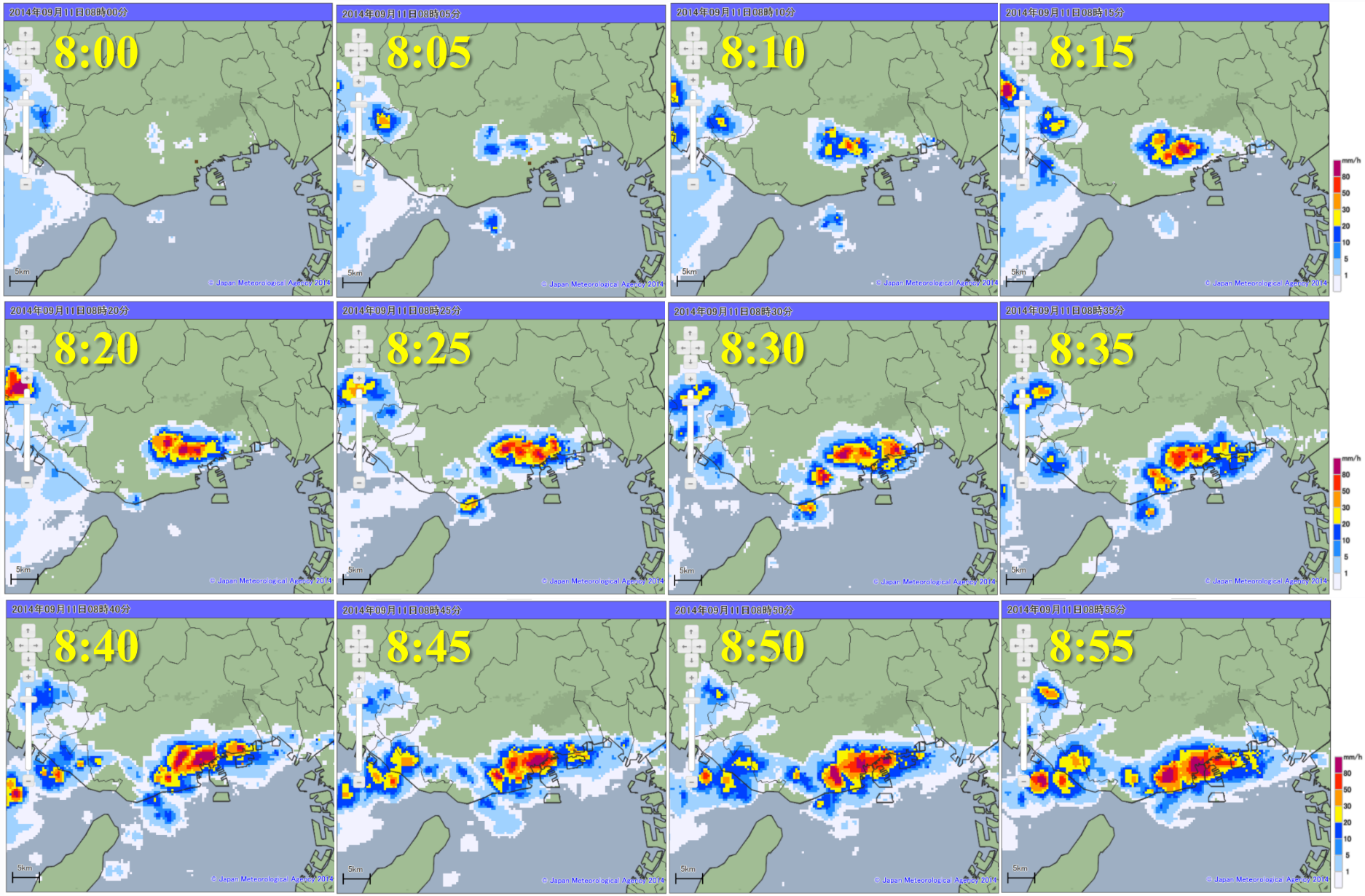
Part Ⅱ
実地上観測データを用いた局地的豪雨事例の同化実験
(2014年9月11日の豪雨事例)

Maejima et al. 2017; SOLA
Miyoshi et al. 2016; Proc. of IEEE
Maejima et al. ; in prep.

実事例のデータ同化実験への取り組み




2014年09月11日08時00分
8:00
2014年09月11日08時05分
8:05
2014年09月11日08時10分
8:10
2014年09月11日08時15分
8:15
2014年09月11日08時20分
8:20
2014年09月11日08時25分
8:25
2014年09月11日08時30分
8:30
2014年09月11日08時35分
8:35
5km
© Japan Meteorological Agency 2014
mm/h
80
50
30
20
10
5
1


2014年09月11日08時00分
8:00
2014年09月11日08時05分
8:05
2014年09月11日08時10分
8:10
2014年09月11日08時15分
8:15
2014年09月11日08時20分
8:20
2014年09月11日08時25分
8:25
2014年09月11日08時30分
8:30
2014年09月11日08時35分
8:35
2014年09月11日08時40分
8:40
2014年09月11日08時45分
8:45
2014年09月11日08時50分
8:50
2014年09月11日08時55分
8:55
5km
© Japan Meteorological Agency 2014
mm/h
80
50
30
20
10
5
1

30秒毎のPAWRによる同化実験の流れ

時刻(JST)　07:45　08:00　08:30

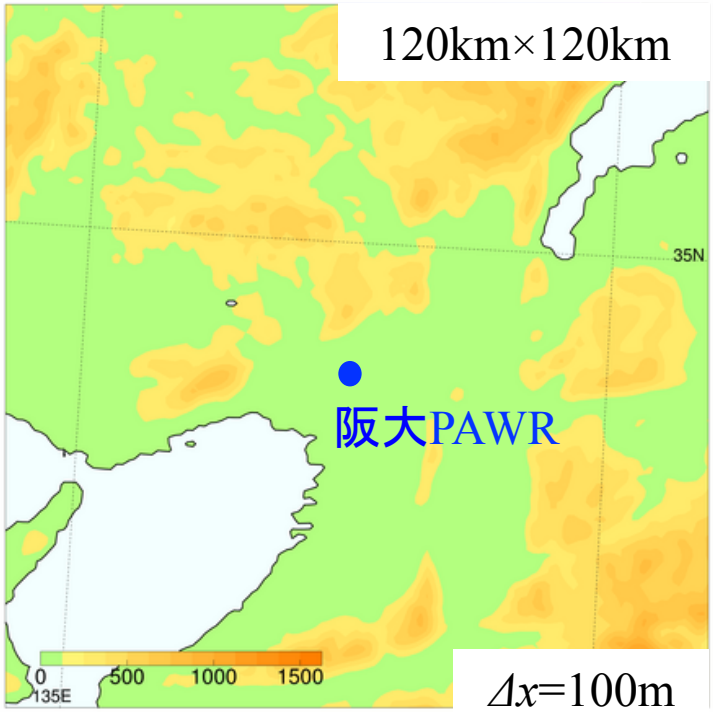
100メンバー

PAWR同化
(1km解像度)

PAWR同化
(1km解像度)

PAWR同化
(100m解像度)

30秒サイクル

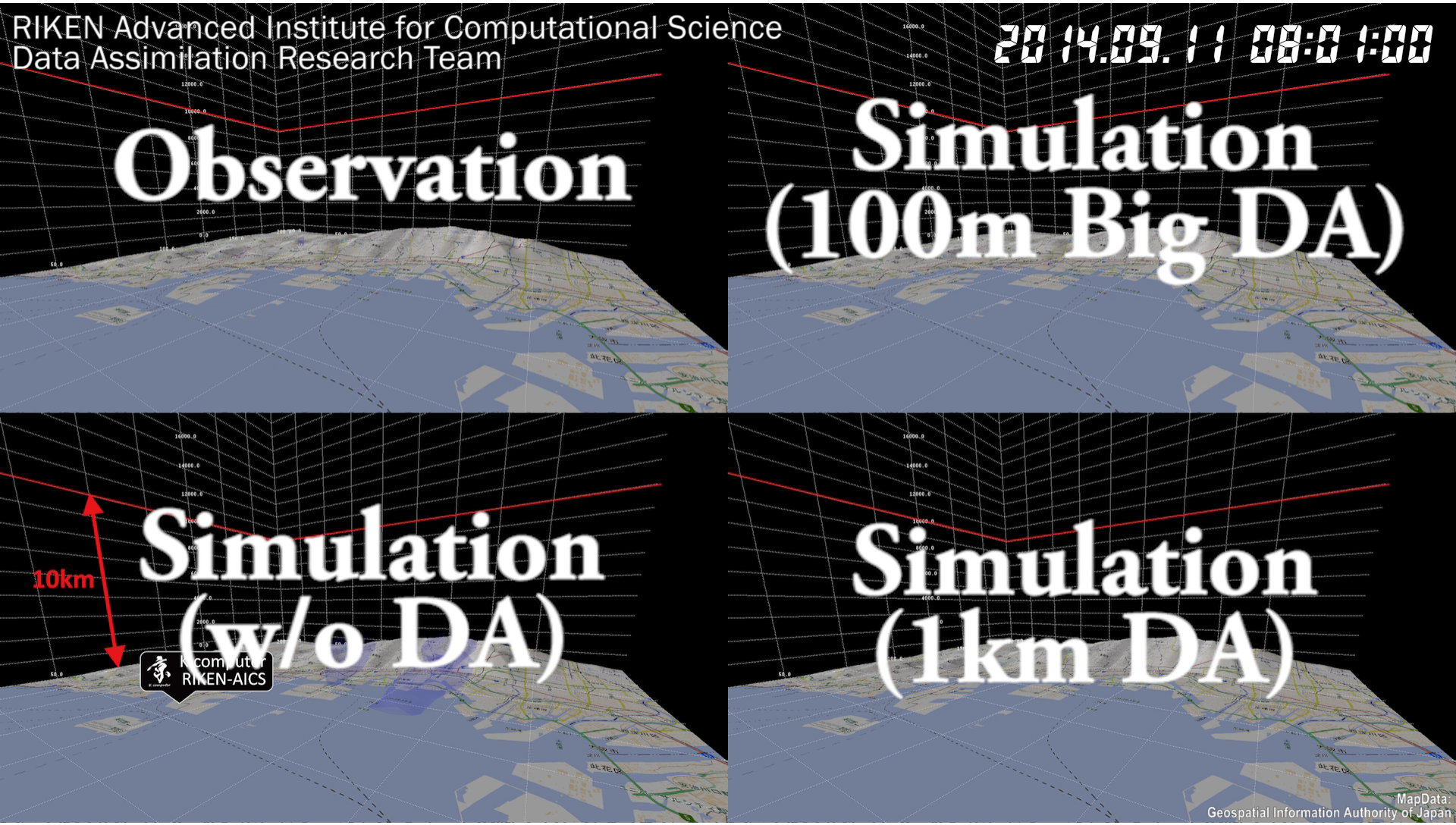


反射強度と動径風を同化する。

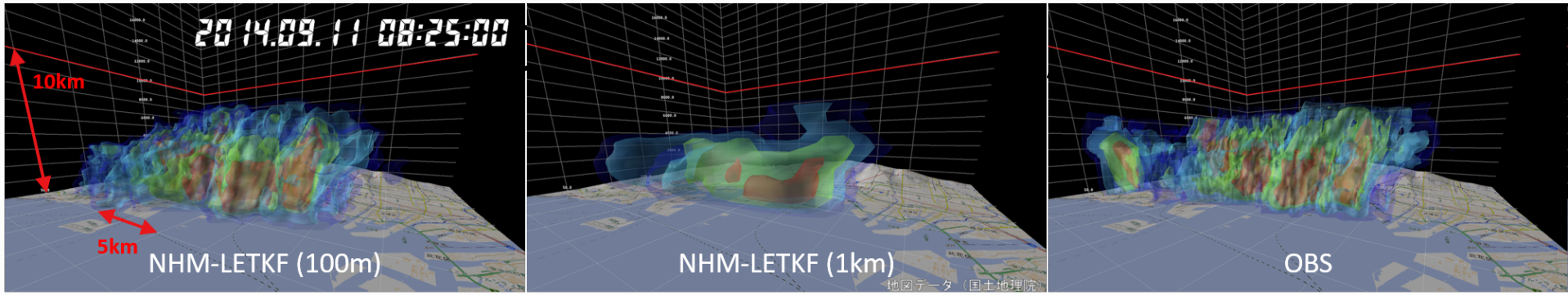
100m解像度での計算量(1サイクル当たり)

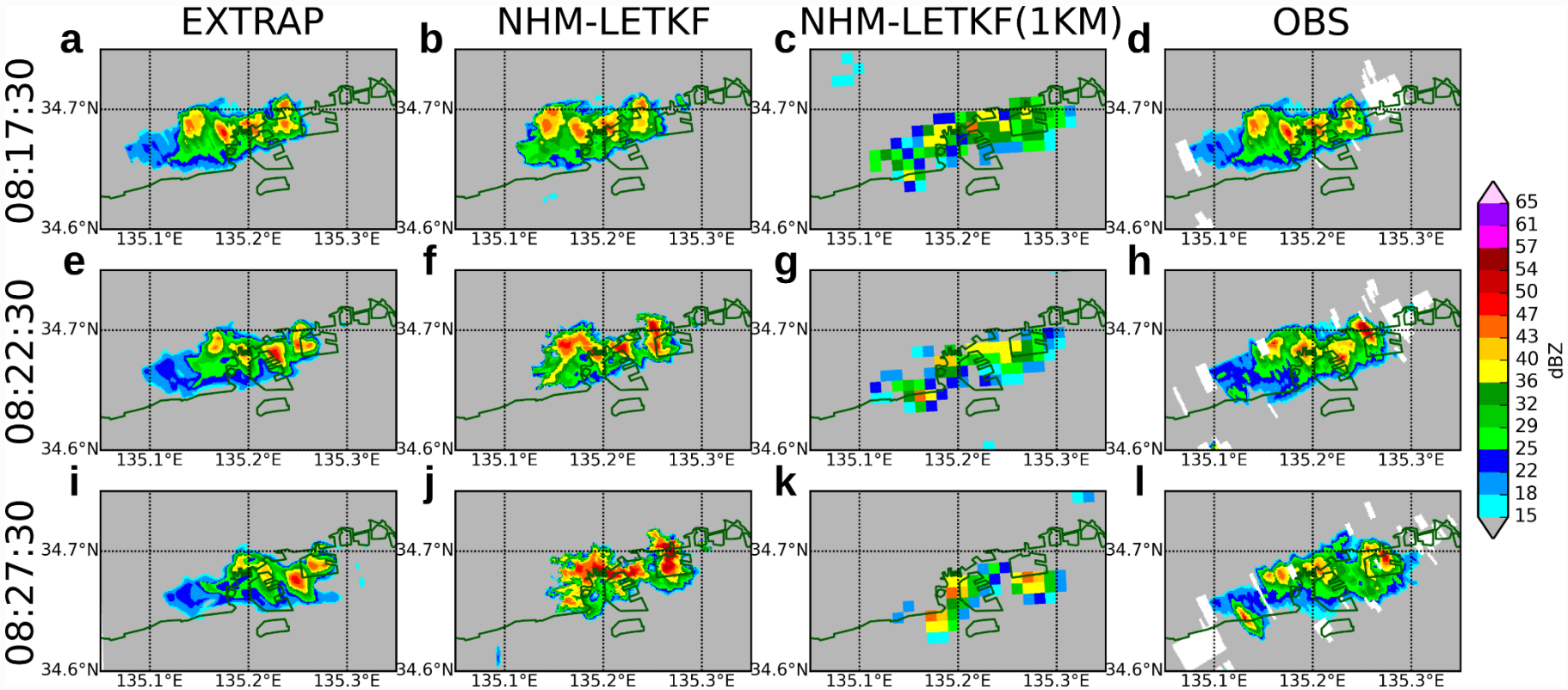
30秒の予報:　京2400ノード　30分
データ同化　:　京1440ノード　25分

30分(60サイクル)の計算に10万ノード時間 必要



Maejima et al. (2017), Miyoshi et al. (2016)





Maejima et al. (2017), Miyoshi et al. (2016)

高頻度地上観測データ同化のインパクト
(30秒毎のPOTEKA II実データ同化実験)

地上観測装置　POTEKA Ⅱ
(R-CCS屋上の設置例)

Photo by S. Otsuka

小学校7校＋R-CCS (計8地点)

Powered by “tree-maps”
(http://tree-maps.appspot.com/prot)

30秒毎にデータを取得

観測量	
風向 [deg]	気温 [℃]
風速 [m/s]	気圧 [hPa]
相対湿度 [%]	感雨 (0 / 1)
日射強度 [W/m^2]	雨量 [mm]

同化する観測量

要素	観測誤差
気温 [℃]	1 K
相対湿度　[%]	10 %

地上観測データ同化に向けての準備

AMeDASとPOTEKA Ⅱの比較

- POTEKA Ⅱの測定値にバイアスが存在する

(Ex) 相対湿度が低く測定される
気圧が高く測定される

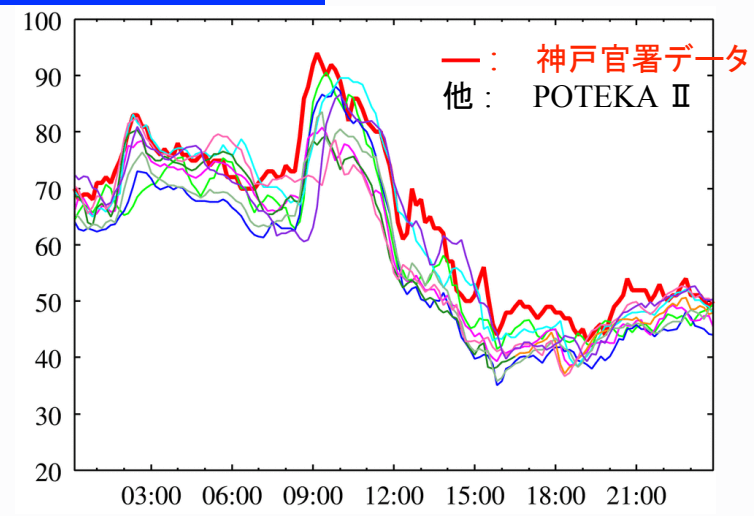
⇩

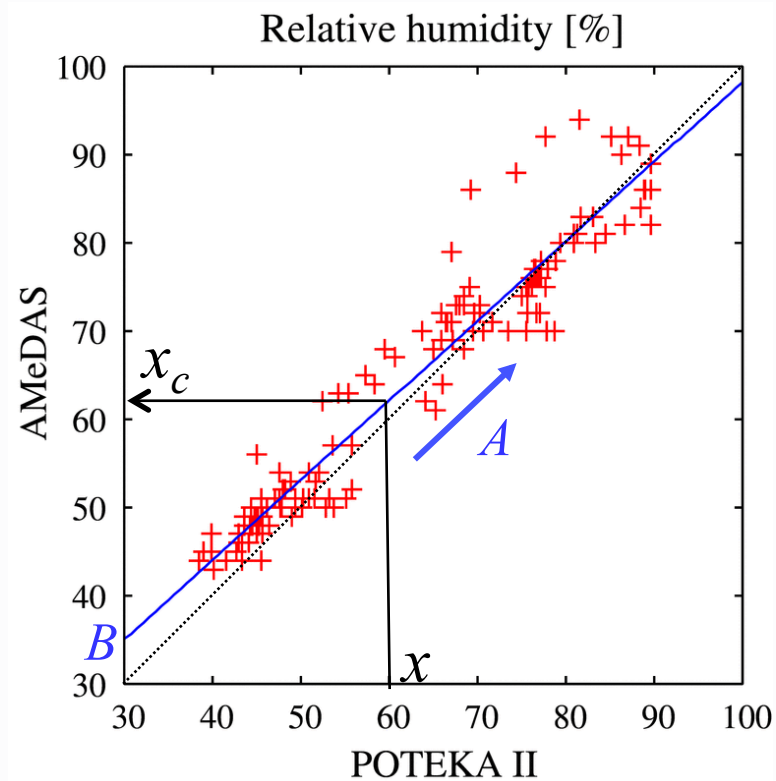
バイアス補正を実施

- POTEKA Ⅱ(x), 気象官署のデータ(y)をプロット
- 最小二乗法によって傾き(A)、切片(B)を導出
- 補正後の値(x_c) を $x_c = Ax + B$ より求める

(以上、10分平均値にて処理)

- POTEKA Ⅱ 30秒データ(x_{30}) : $x_{30} = x + x'$
- 補正後の30秒データ(x_{c30}) : $x_{c30} = x_c + x'$

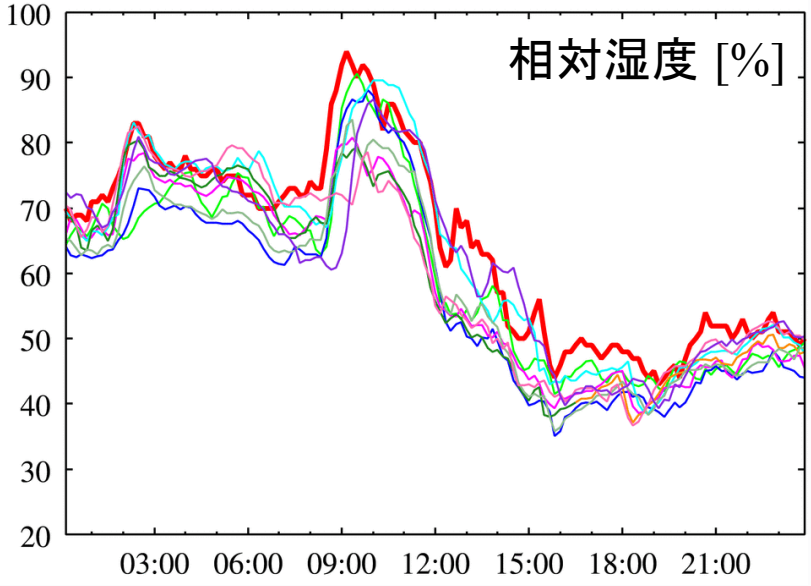


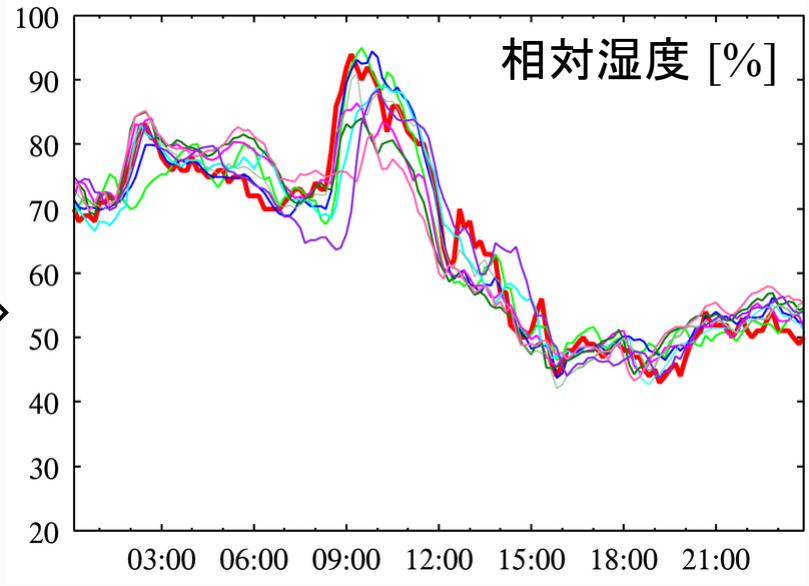


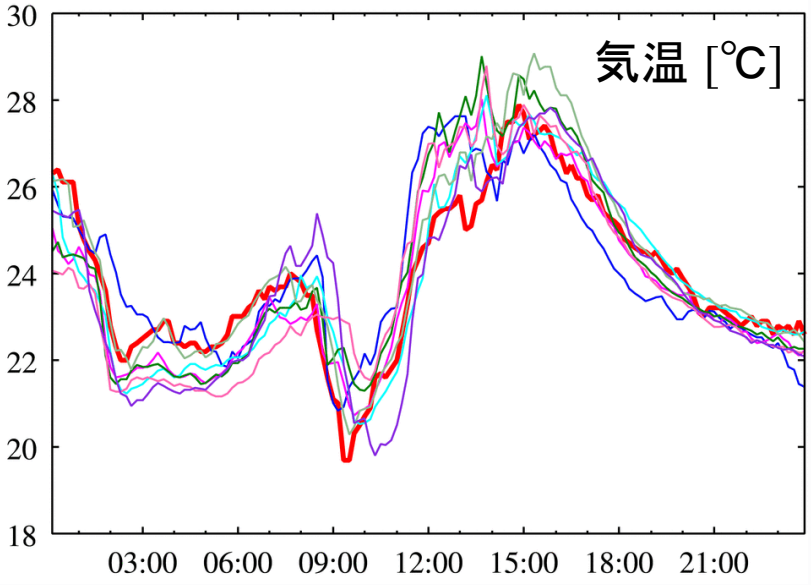
バイアス補正後のPOTEKA Ⅱのデータ

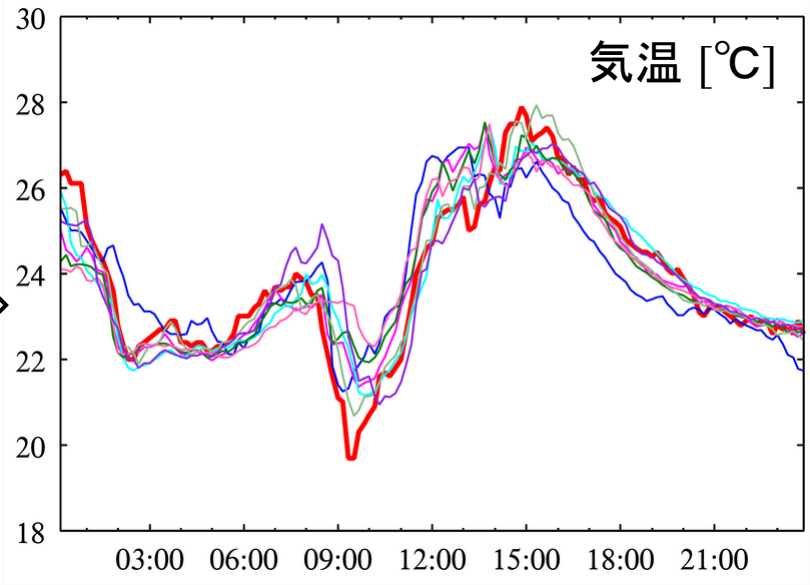
補正前

補正後

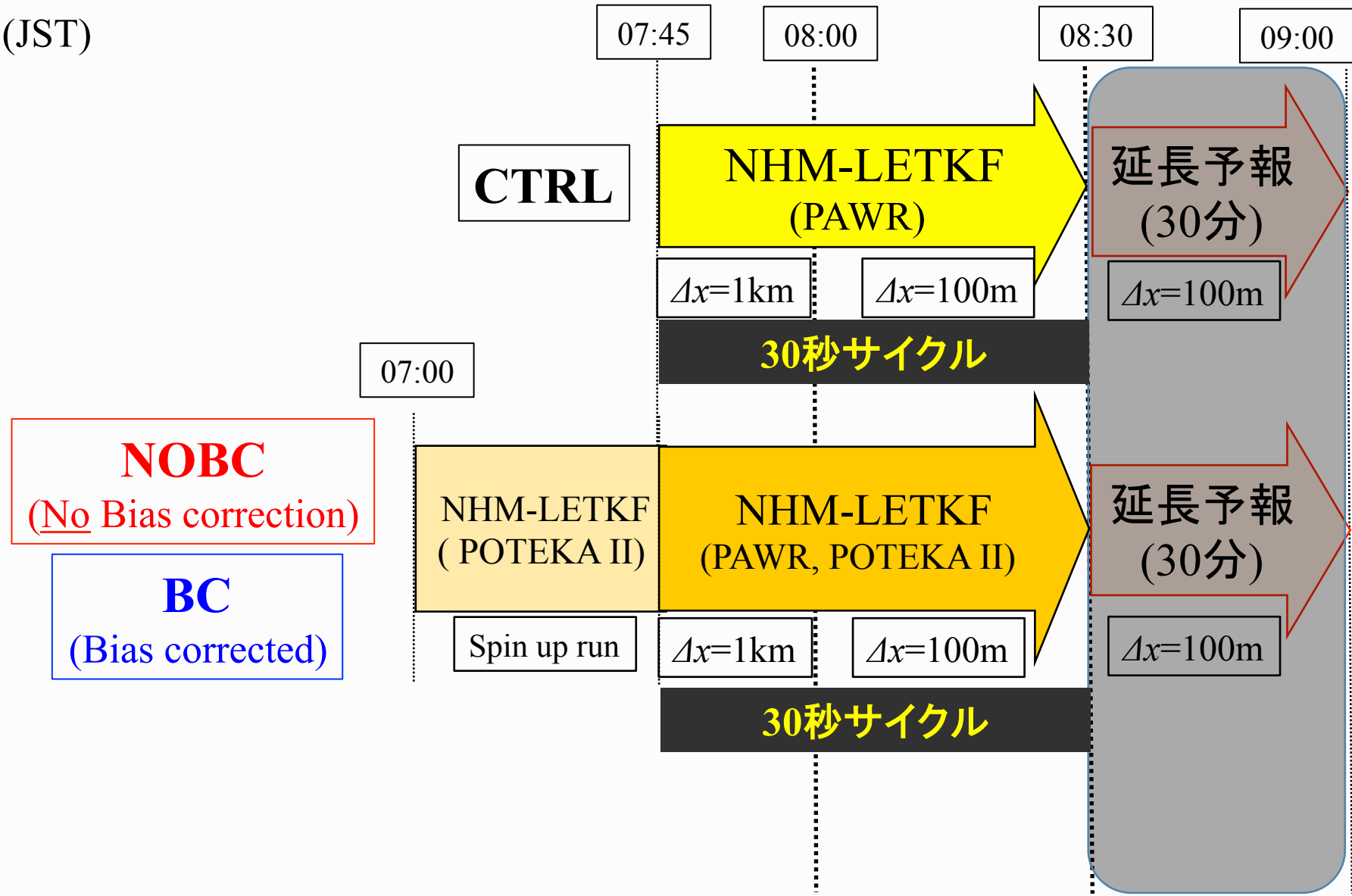




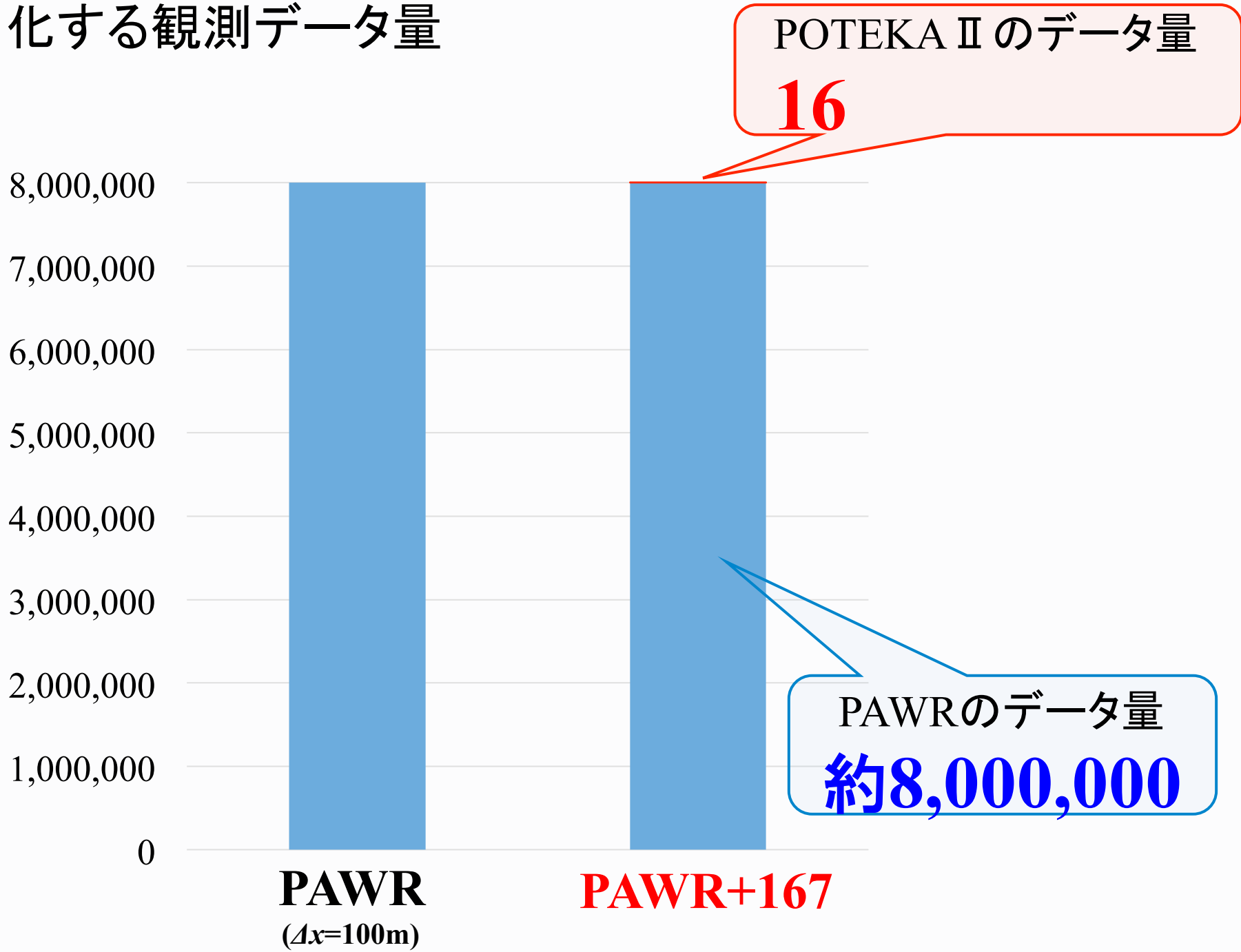




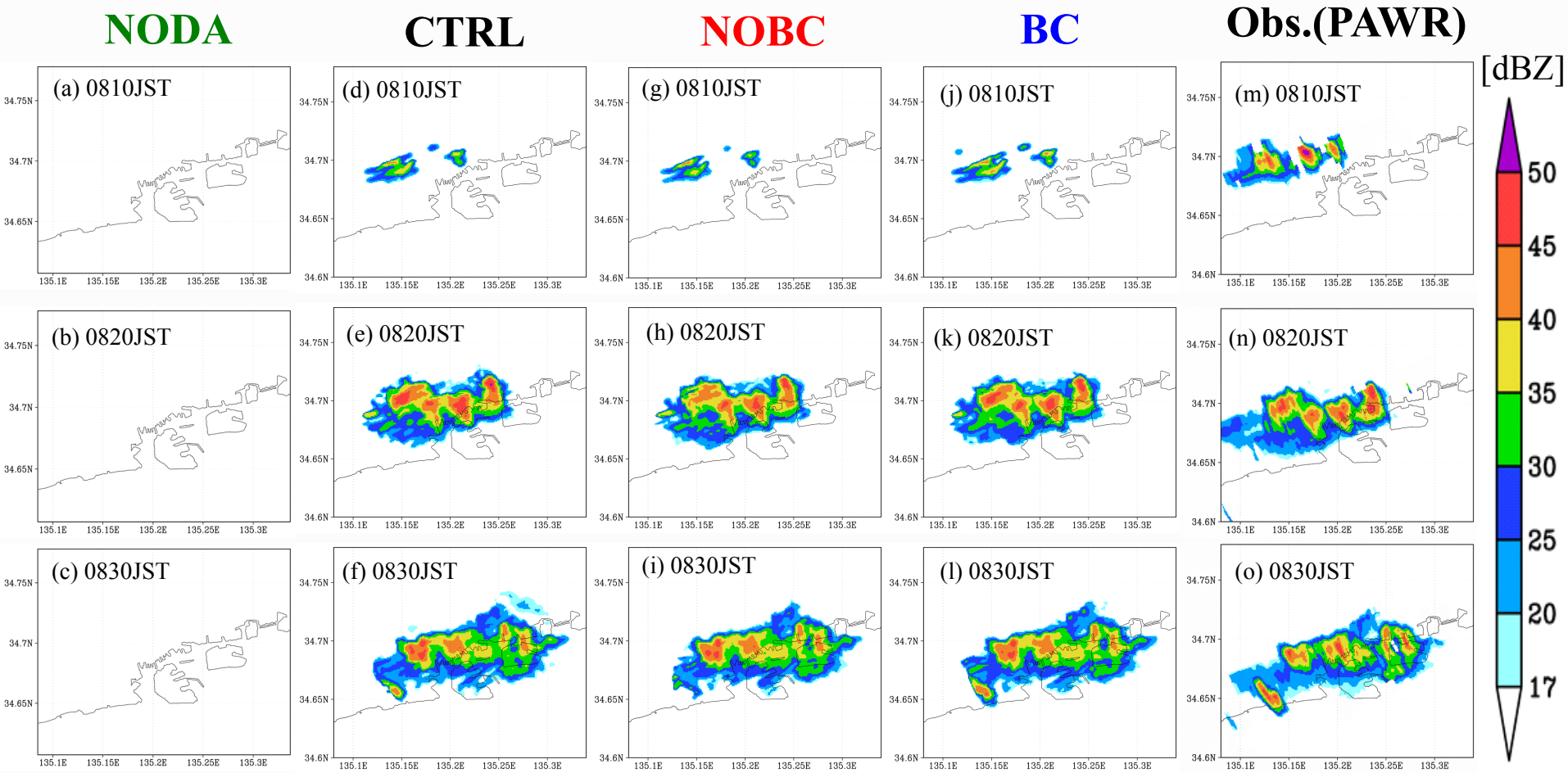
地上観測データ同化実験の流れ



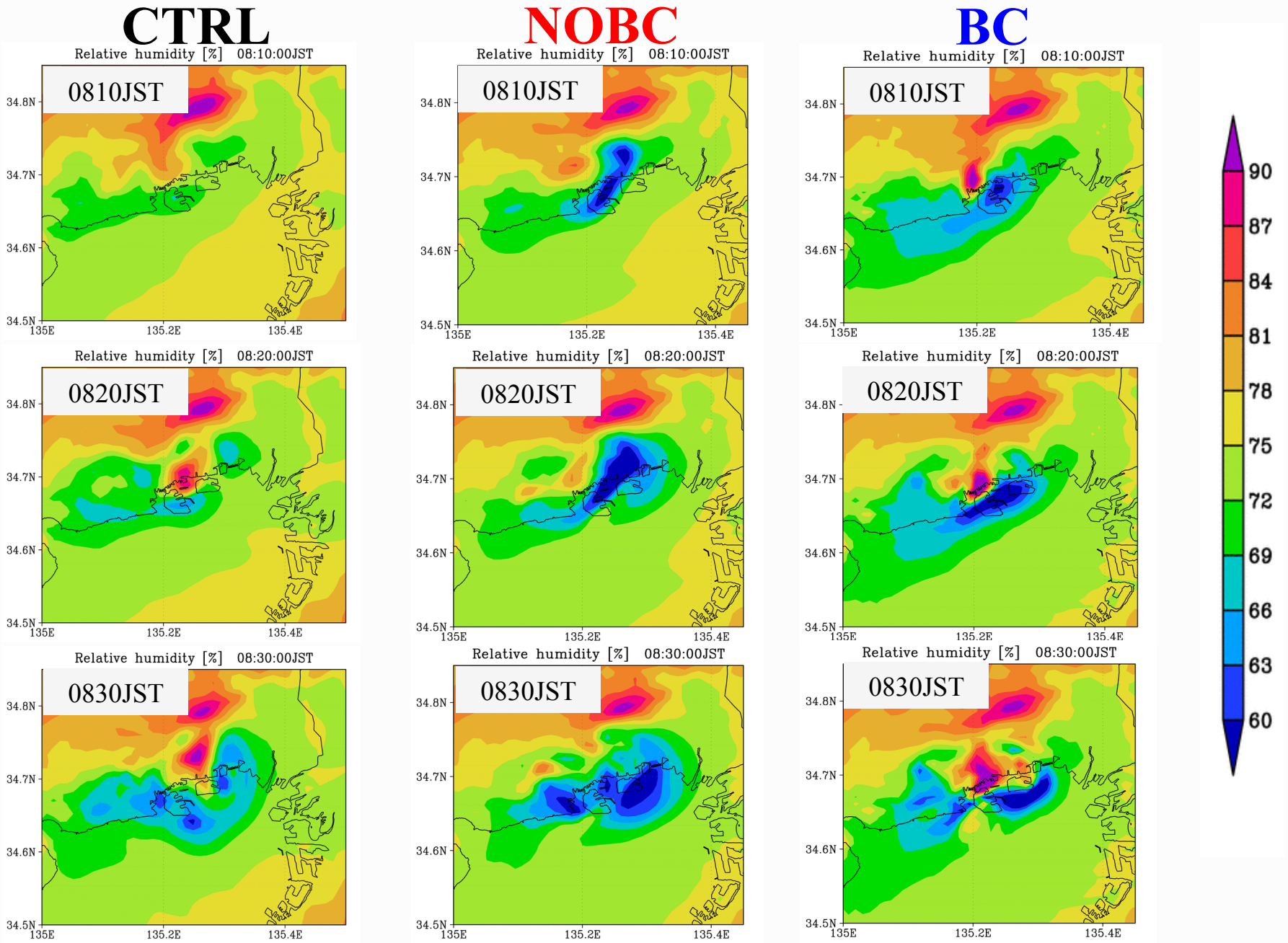
同化する観測データ量


POTEKA Ⅱ のデータ量
16
8,000,000
7,000,000
6,000,000
5,000,000
4,000,000
3,000,000
2,000,000
1,000,000
0
PAWRのデータ量
約8,000,000
PAWR
(Δx=100m)
PAWR+167

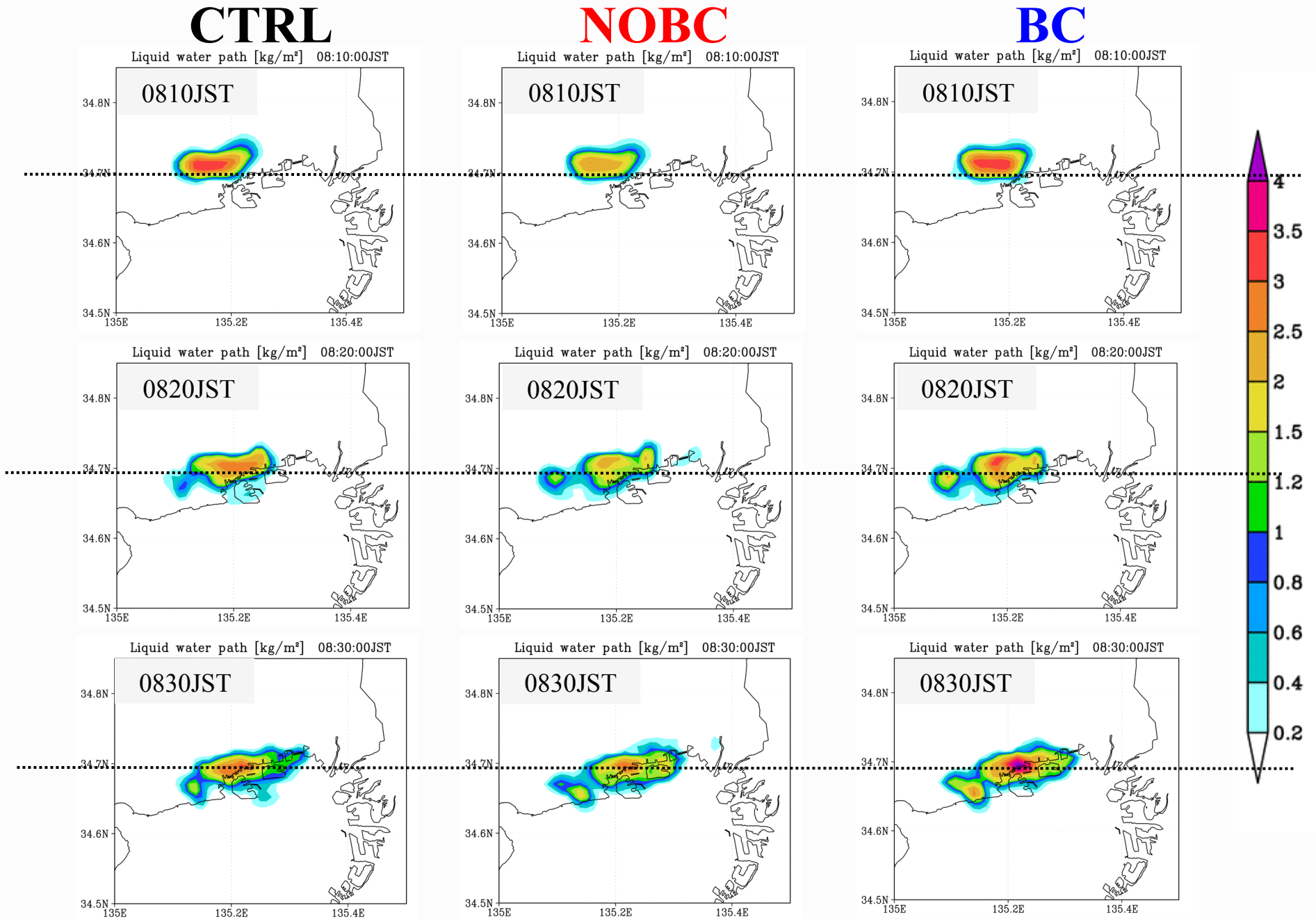
高度2kmにおけるレーダー反射強度 (Analysis)



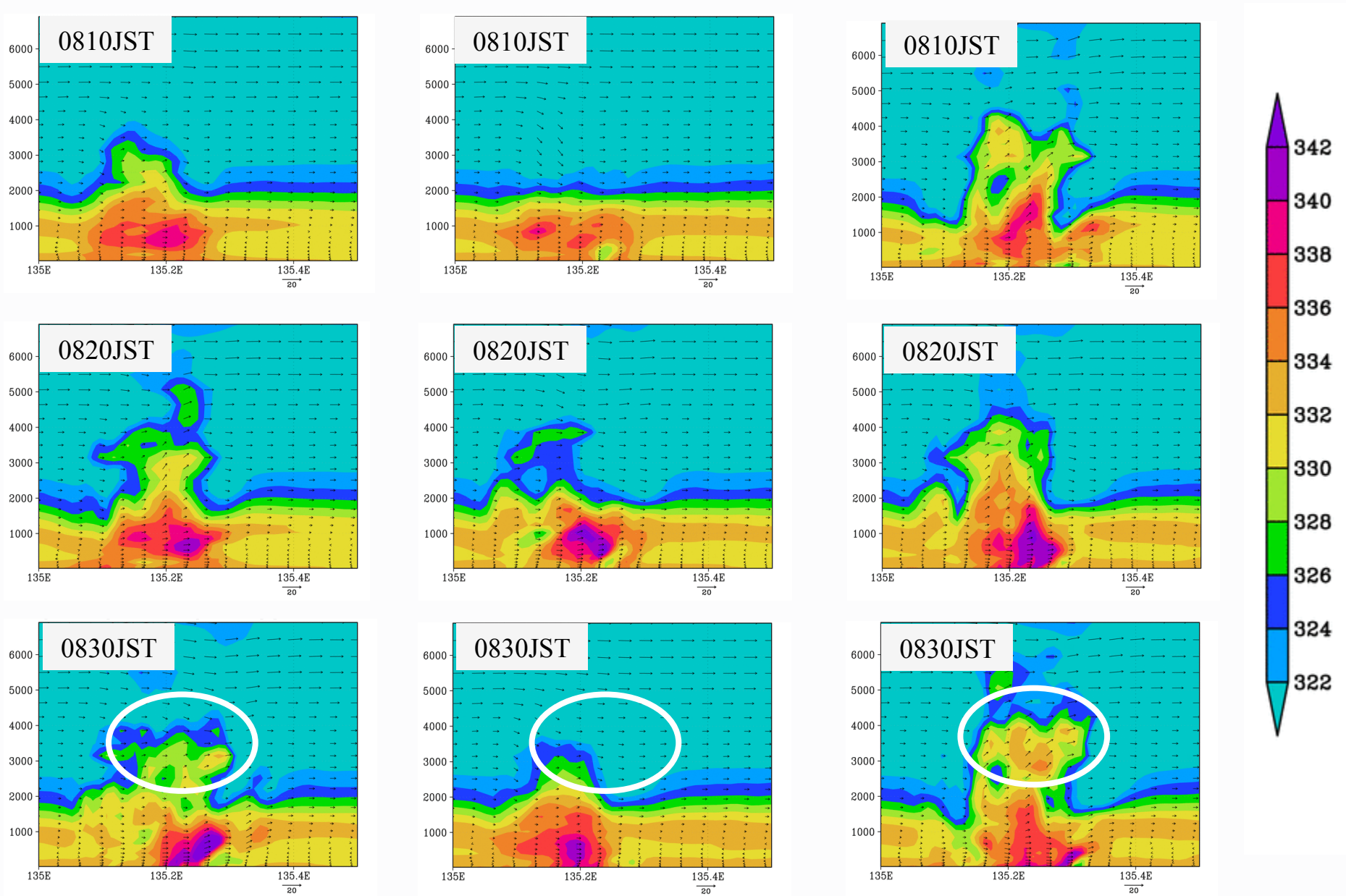
地上相対湿度 [%] (解析値)


CTRL
NOBC
BC
Relative humidity [%] 08:10:00JST
Relative humidity [%] 08:20:00JST
Relative humidity [%] 08:30:00JST
0810JST
0820JST
0830JST
34.8N
34.7N
34.6N
34.5N
135E
135.2E
135.4E
90
87
84
81
78
75
72
69
66
63
60

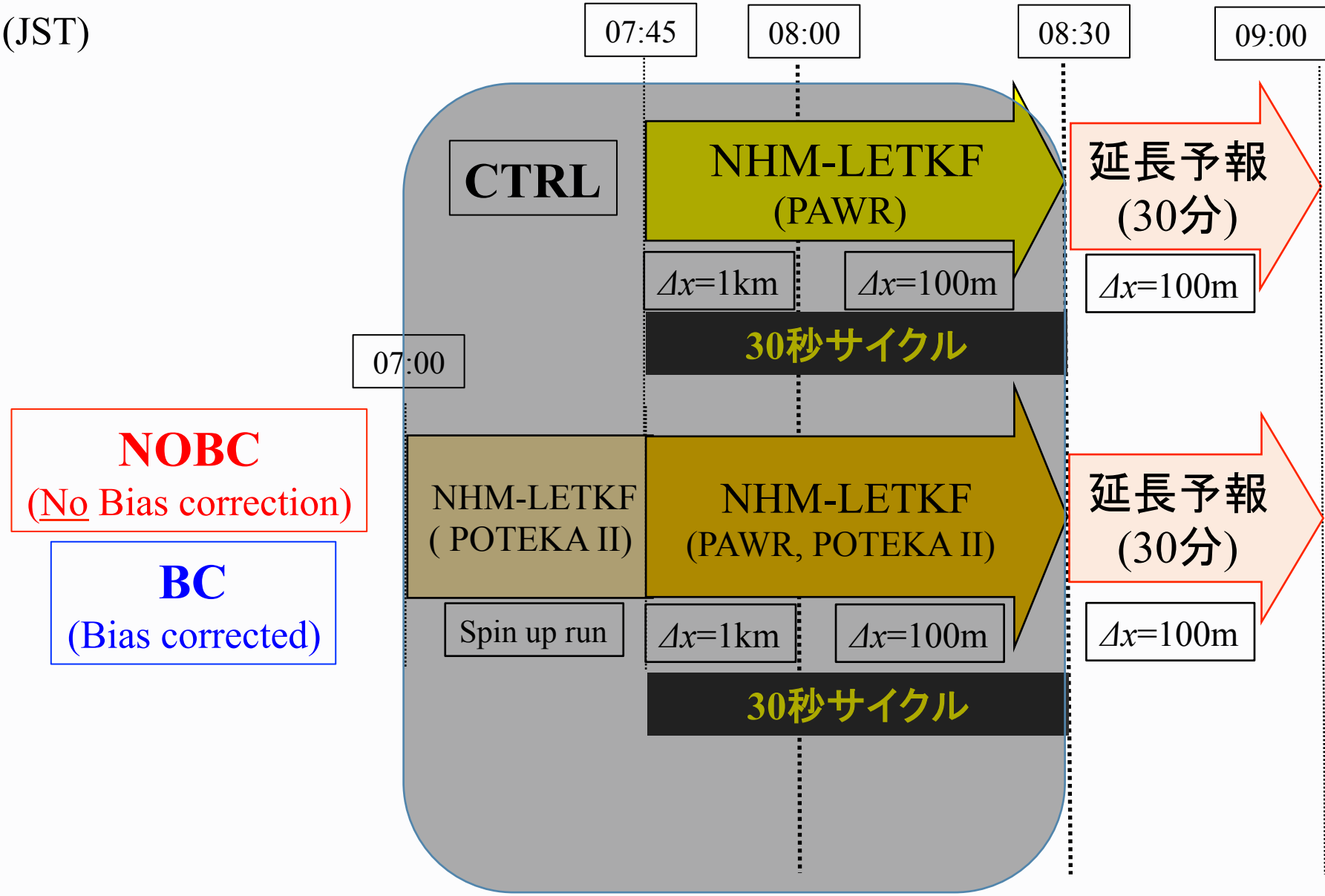
Liquid water path [kg/m^2] (解析値)



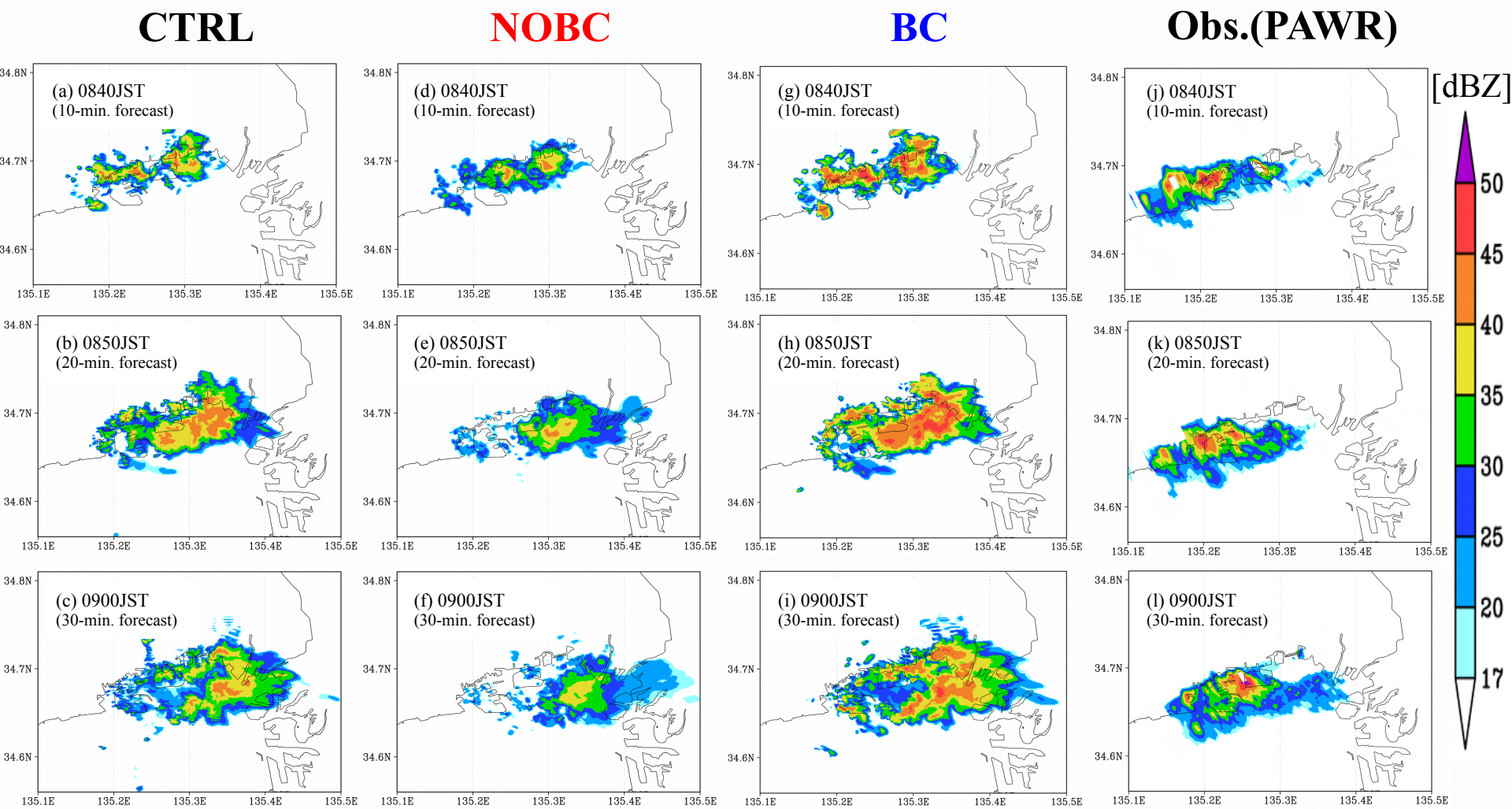
相当温位[K]の南北高度断面 (34.695N) (解析値)



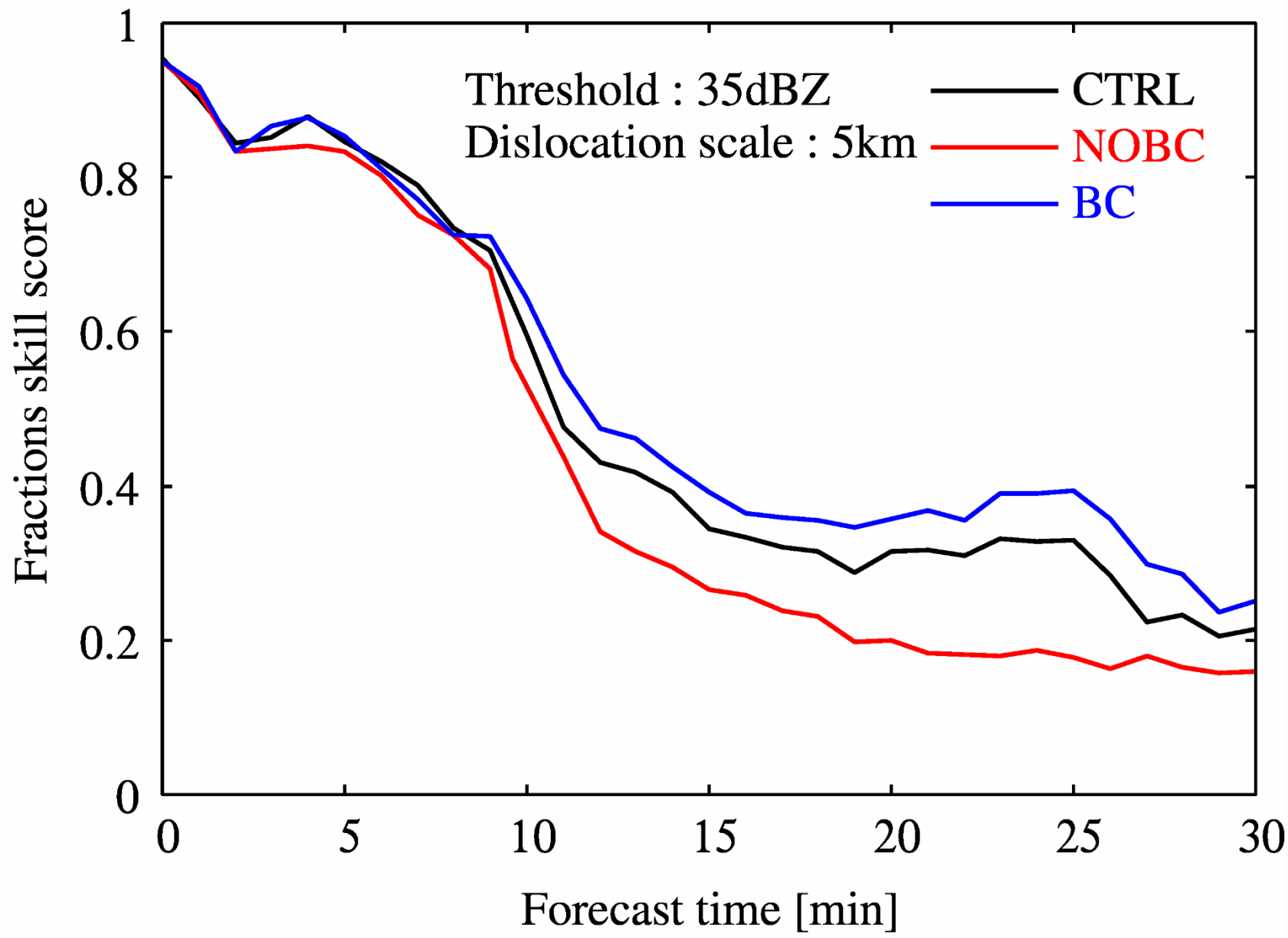
延長予報実験


時刻(JST)
07:45
08:00
08:30
09:00
07:00
CTRL
NHM-LETKF
(PAWR)
Δx=1km
Δx=100m
30秒サイクル
延長予報
(30分)
Δx=100m
NOBC
(No Bias correction)
BC
(Bias corrected)
NHM-LETKF
(POTEKA II)
NHM-LETKF
(PAWR, POTEKA II)
Spin up run
Δx=1km
Δx=100m
30秒サイクル
延長予報
(30分)
Δx=100m

高度2kmのレーダー反射強度: 初期時刻0830 JST



予報実験のフラクションスキルスコア



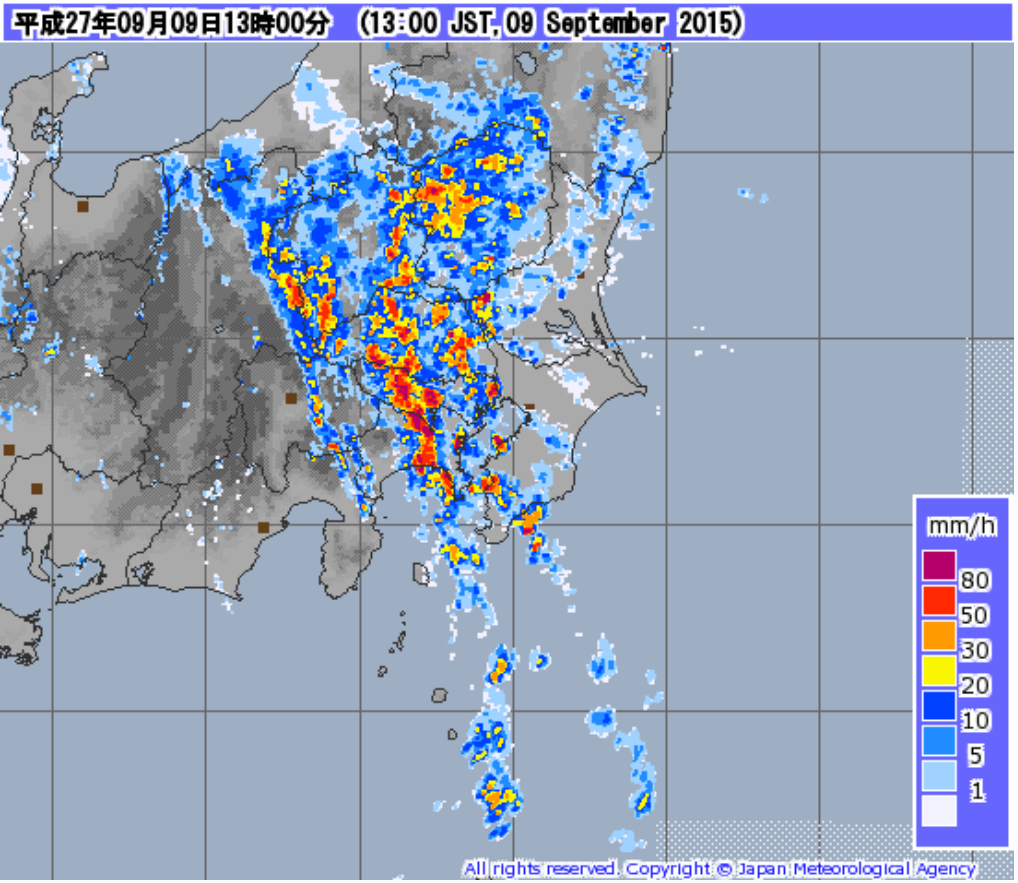
2014年9月11日事例における同化実験のまとめ

- 100mメッシュ, 100アンサンブルメンバー, 30秒同化サイクルによるシミュレーションによって、孤立積乱雲による局地的豪雨を詳細に再現することに成功した。
- シンプルなバイアス補正のアルゴリズムによって、簡易的な機器による観測データを適切に扱えた。
- 僅か8地点の地上観測データを同化することで、局地的豪雨をもたらす大気場の改善が見られた。
- 降水予報においても改善が見られた。

Part Ⅲ
平成27年関東・東北豪雨事例における稠密地上観測データ同化実験

Maejima et al. ; in prep.

平成27年9月関東・東北豪雨



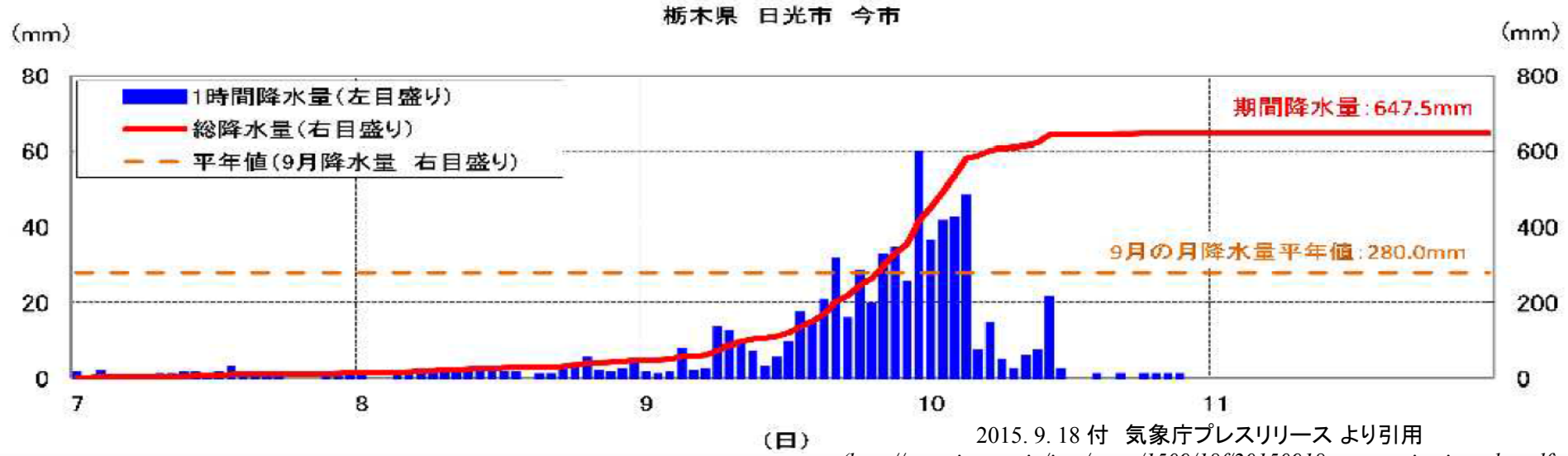
(東大大気海洋研: 新野宏教授 提供)

2日間で600mmを超える降水を観測

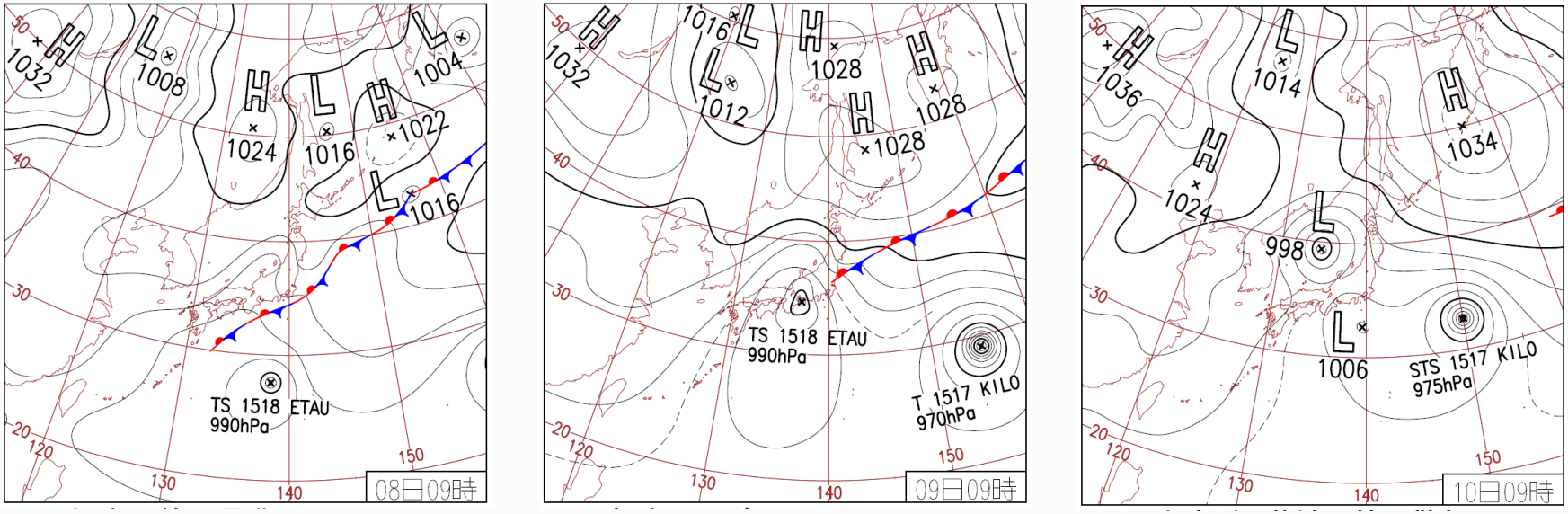
鬼怒川の大洪水の様子

(2015年9月10日; 産経新聞オンライン版より引用)

豪雨の概況



2015. 9. 18 付　気象庁プレスリリース より引用
(http://www.jma.go.jp/jma/press/1509/18f/20150918_gouumeimei_sanko.pdf)

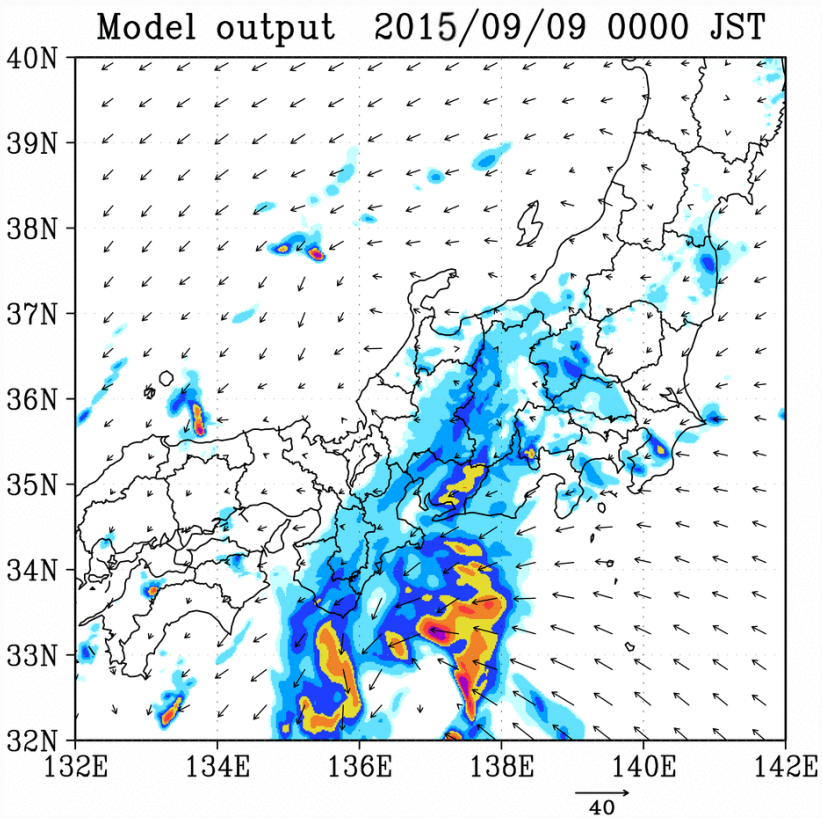


気象庁HP:　日々の天気図より引用*(http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html)*

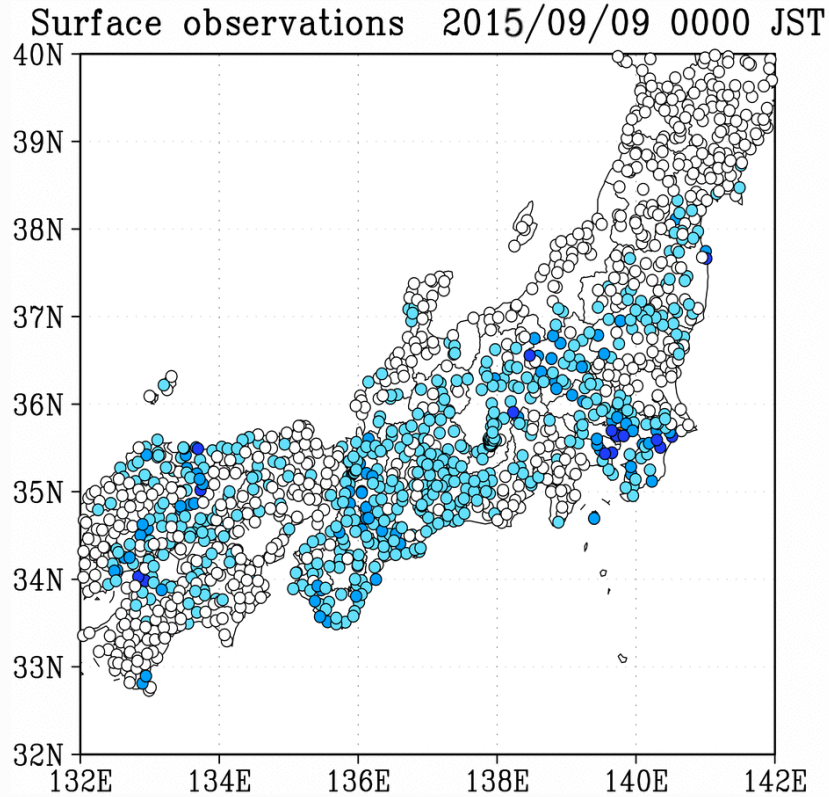
2015年9月9日～9月10日　地上降水・風速

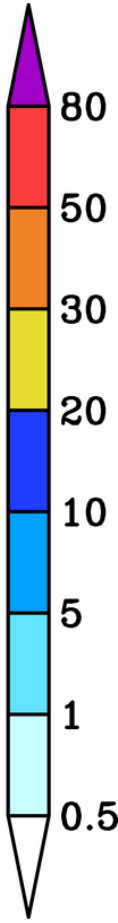
[mm/h]

初期時刻：9/8 21JST



NTTドコモ環境センサーネットワーク



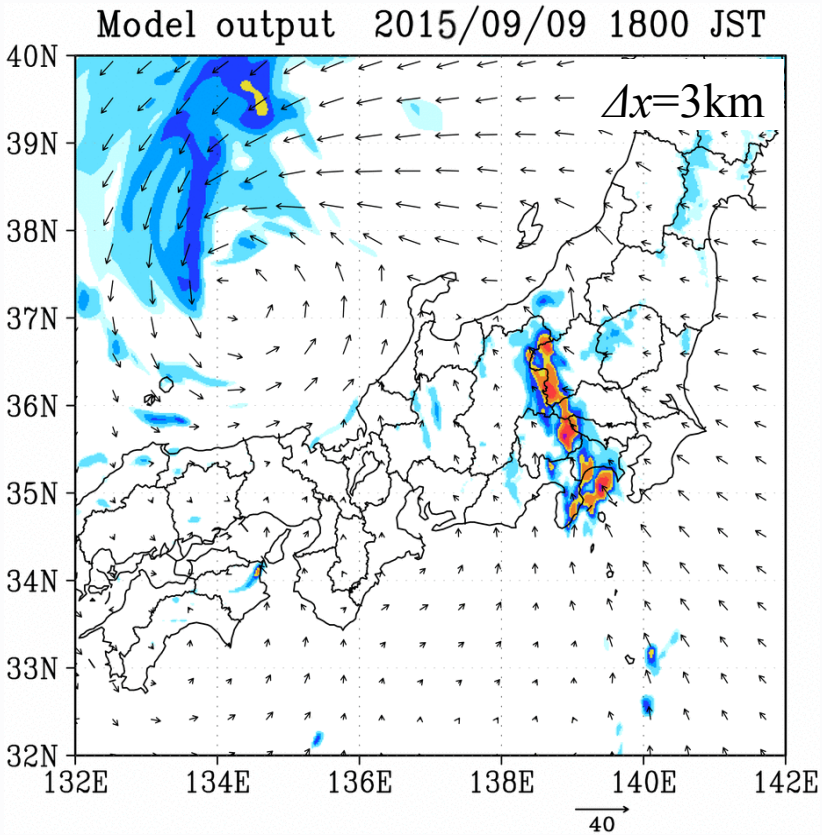


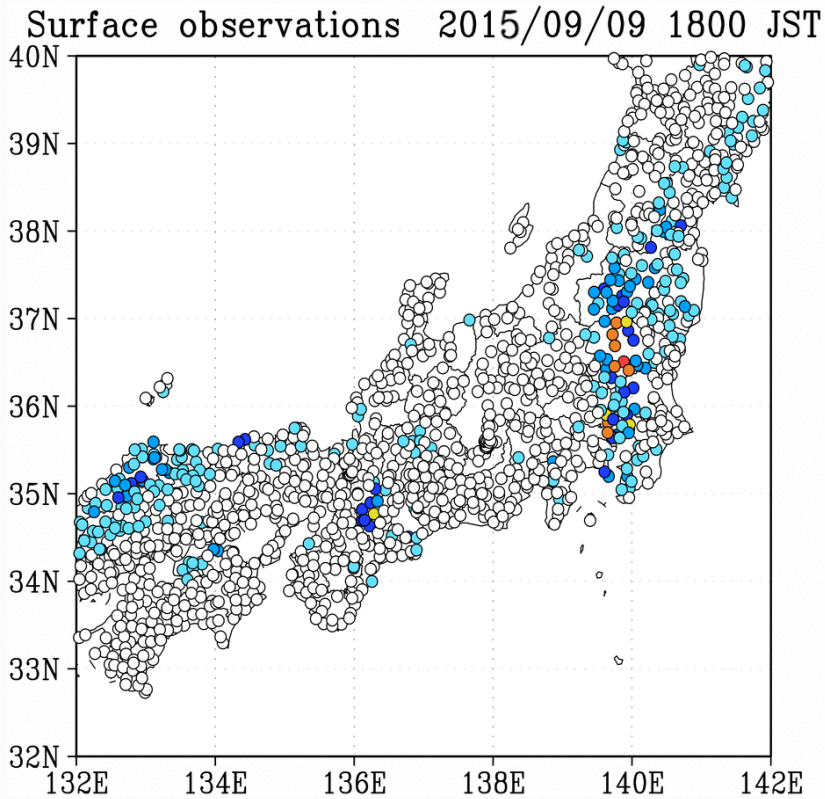
(三好 他：ポスト「京」重点課題④サブA研究連絡会, 2015. 4. 21) より引用

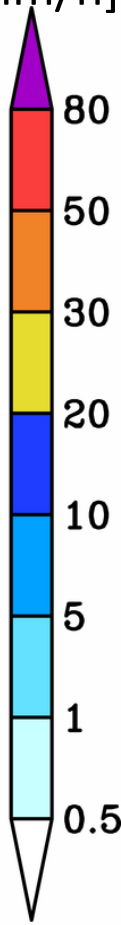
NCEP PREPBUFRを同化 ⇒ アンサンブル平均からの5日間予報を実施

初期時刻：9/8 21JST

NTTドコモ環境センサーネットワーク







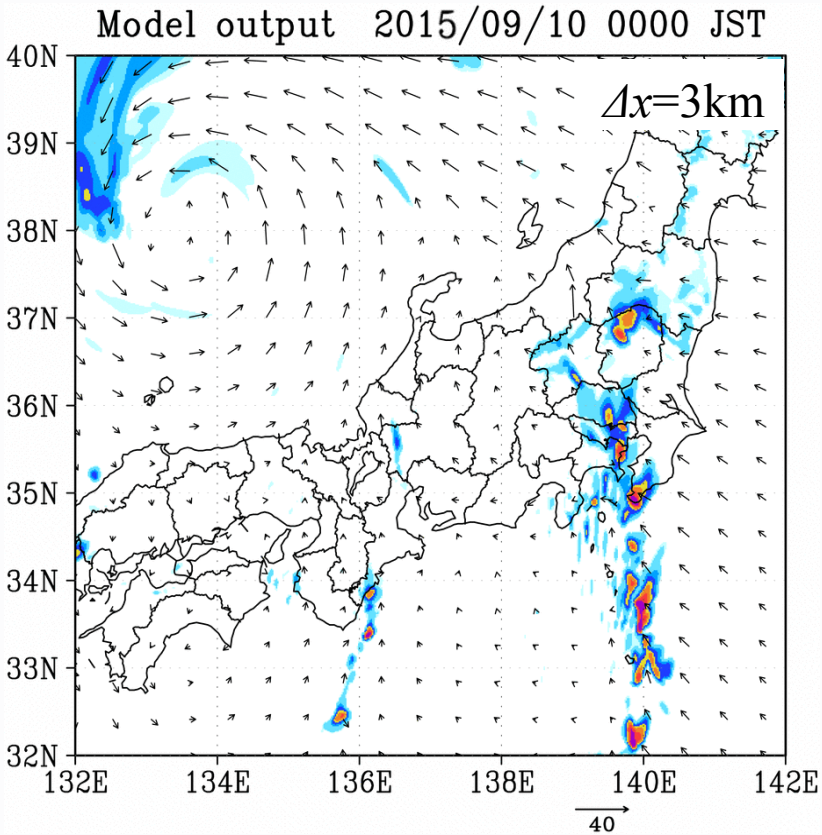
西にずれている

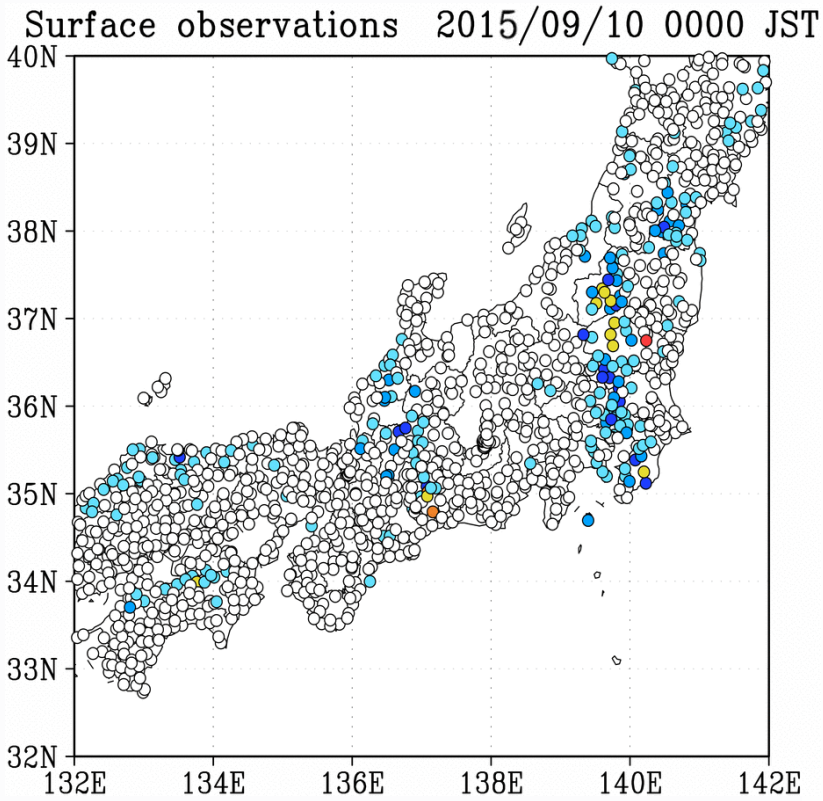
(三好 他：ポスト「京」重点課題④サブA研究連絡会, 2016. 4. 21) より引用

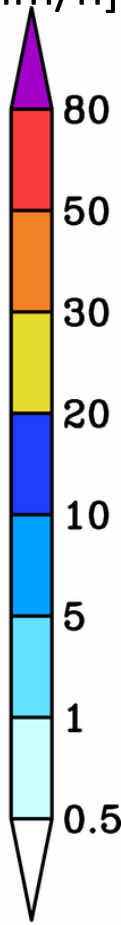
NCEP PREPBUFRを同化 ⇒ アンサンブル平均からの5日間予報を実施

初期時刻：9/8 21JST

NTTドコモ環境センサーネットワーク





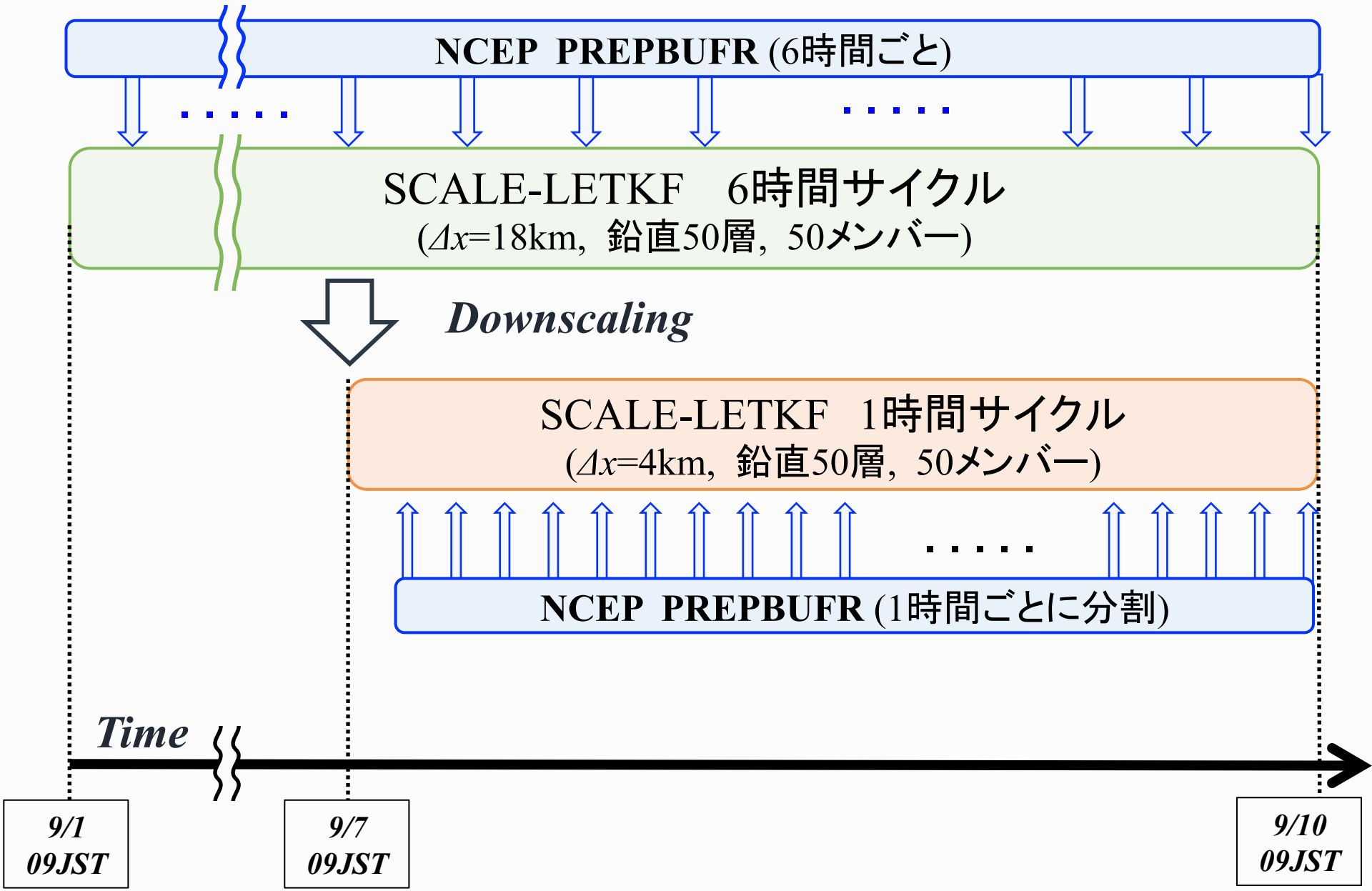


位置は良いが、途切れている

(三好 他：ポスト「京」重点課題④サブA研究連絡会, 2016. 4. 21) より引用

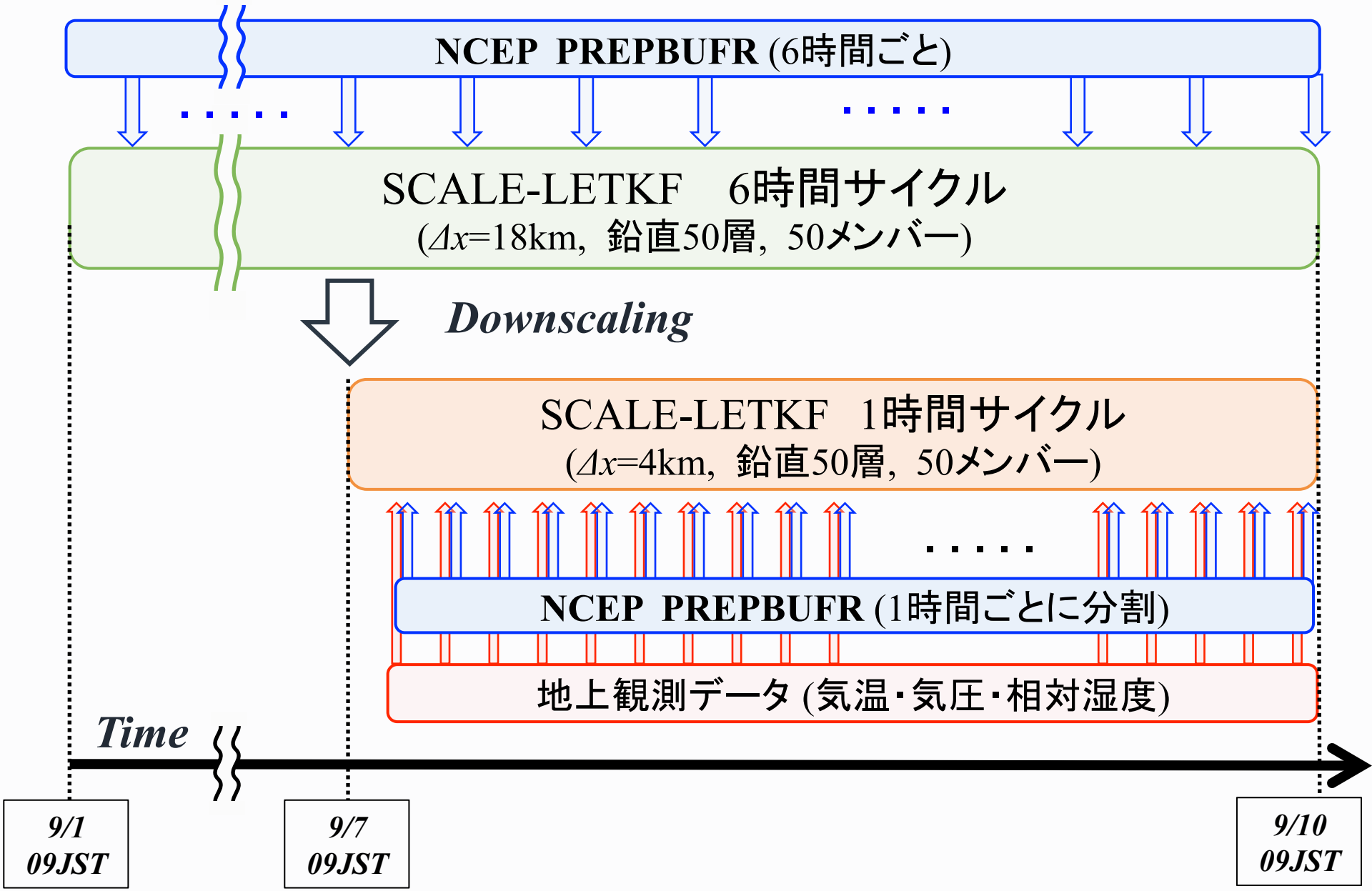
データ同化実験の流れ

CTRL



データ同化実験の流れ

TEST



用いた観測データとLETKFの設定

NTT DoCoMo環境センサーネットワーク

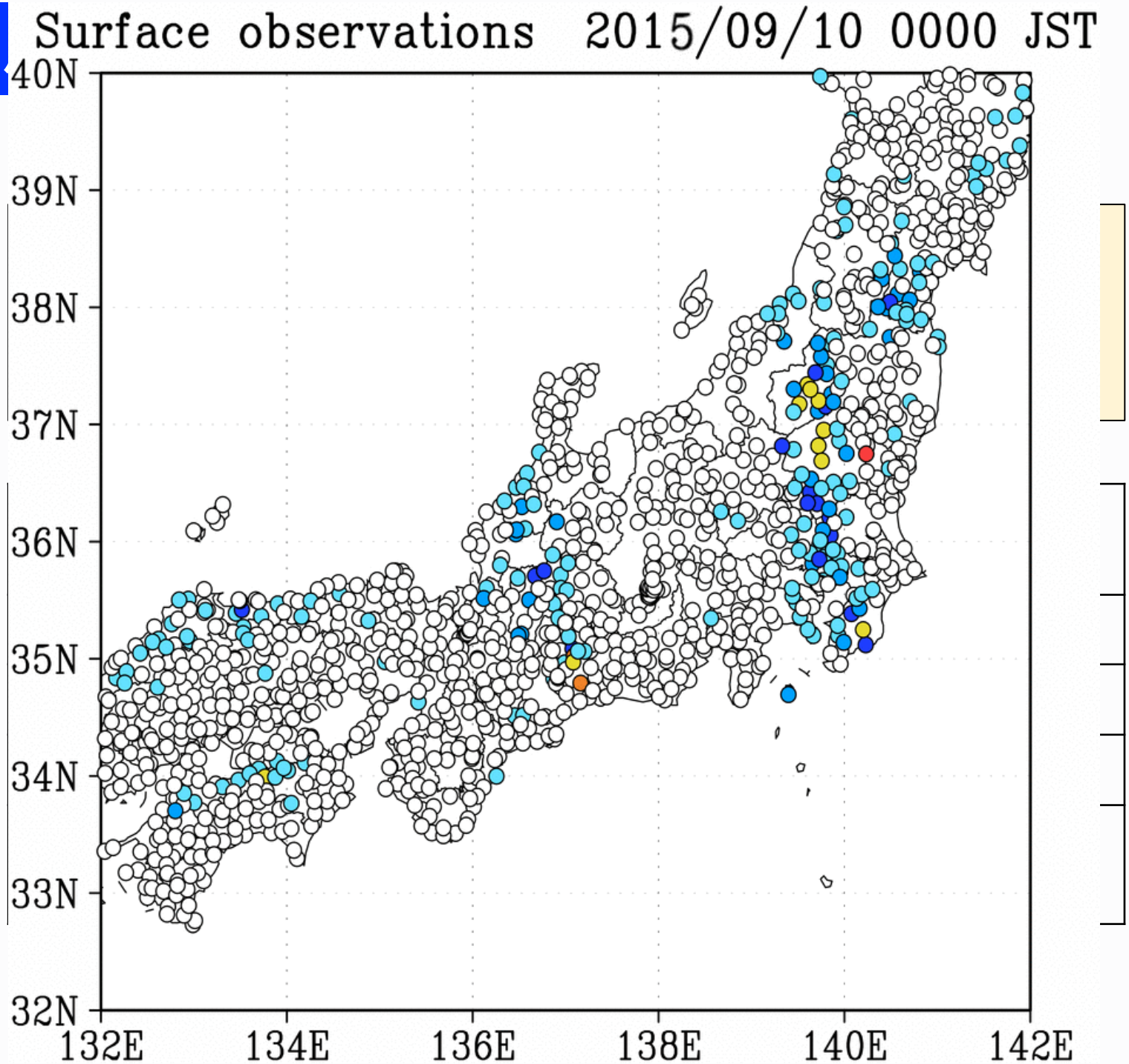
(1時間毎, 全国約4000点)

同化した観測要素	観測誤差(標準偏差)
相対湿度	10%
気温	1 K
気圧	1 hPa

局所化半径(σ)　30 km (horizontal),
1000 m (vertical)

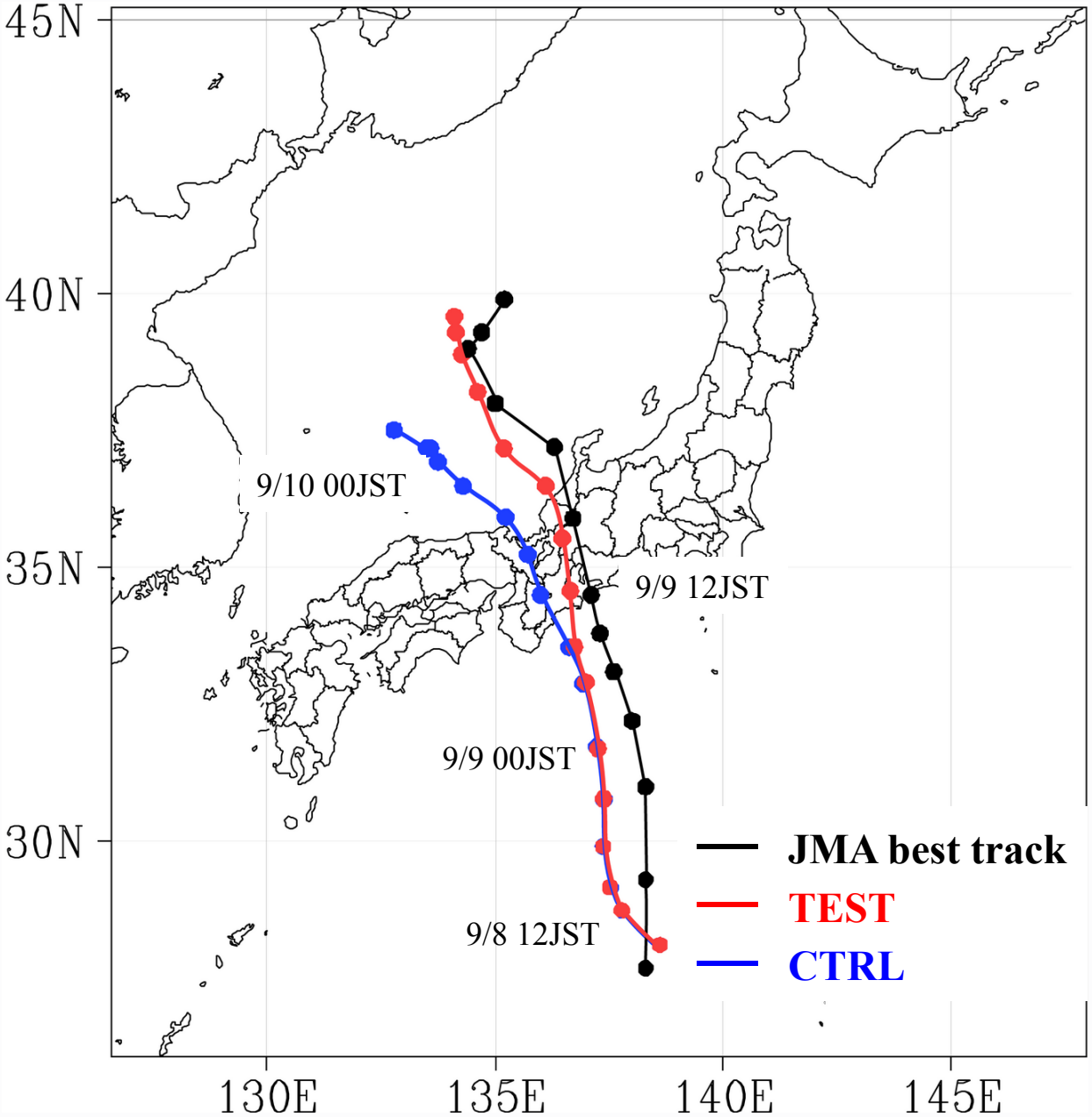
インフレーションとして、RTPS (=0.85)を適用

3.2


Surface observations 2015/09/10 0000 JST
40N
39N
38N
37N
36N
35N
34N
33N
32N
132E
134E
136E
138E
140E
142E

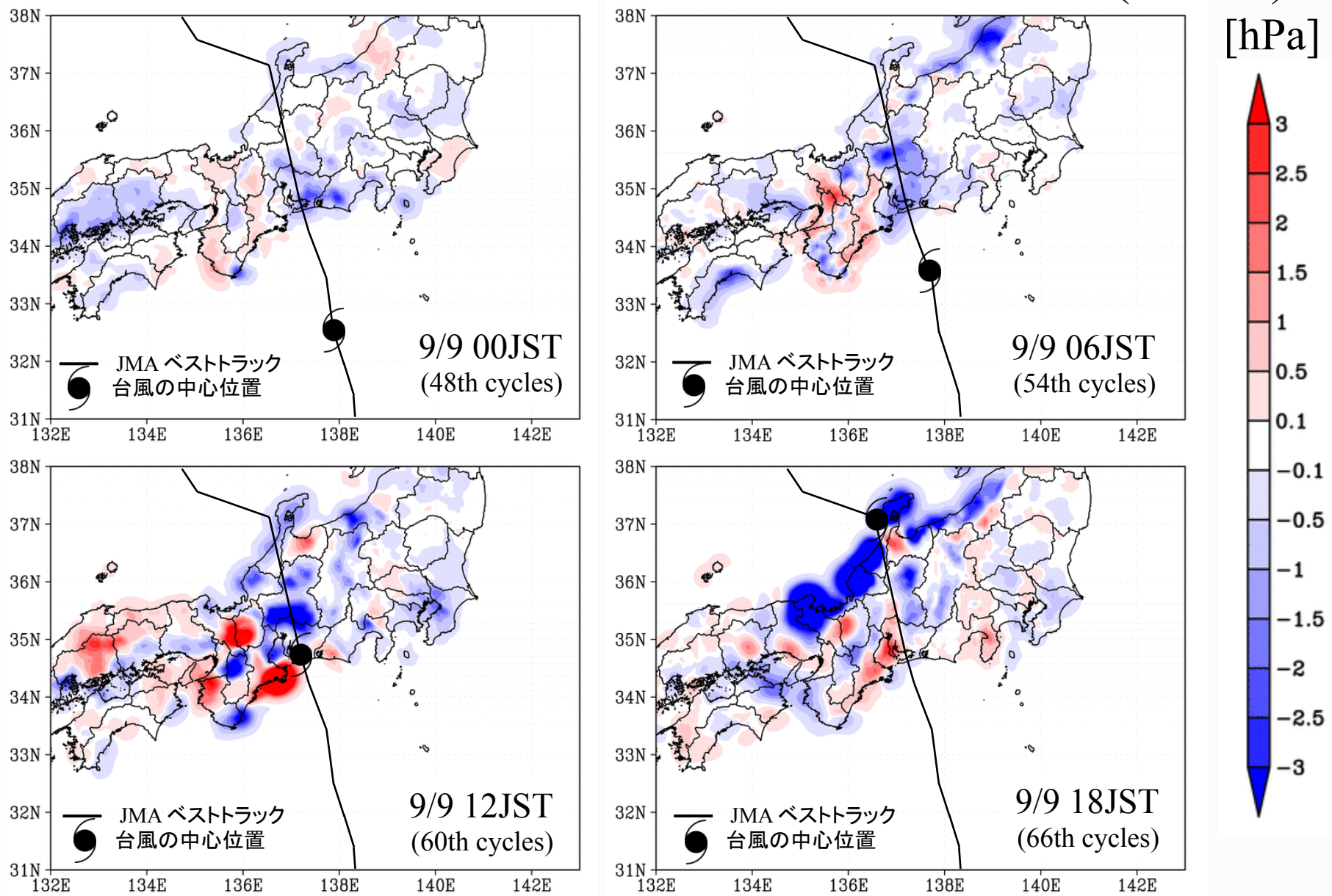
台風(T1518; Etau)の進路へのインパクト

(解析値)

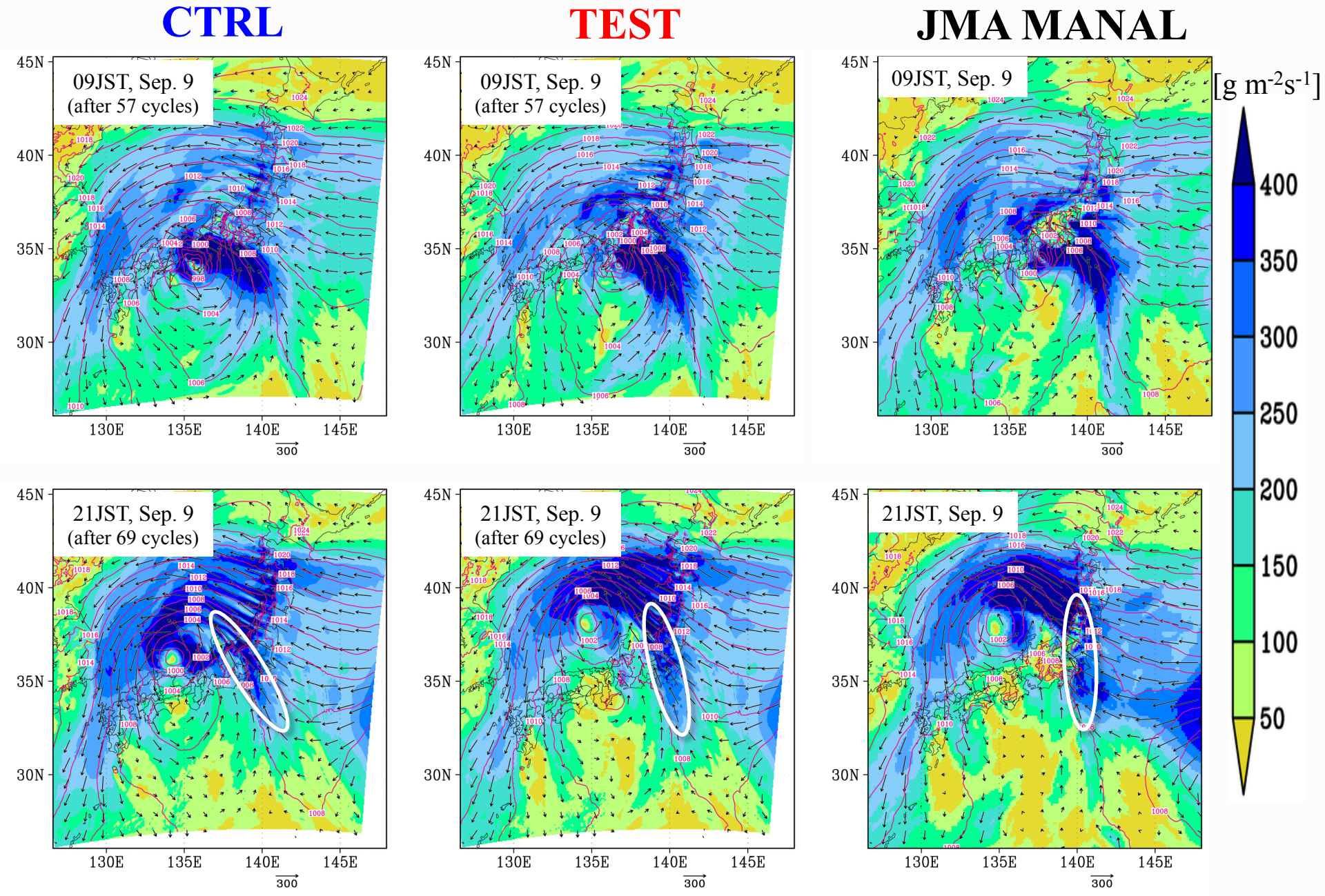


台風北上時の解析インクリメント(海面気圧)

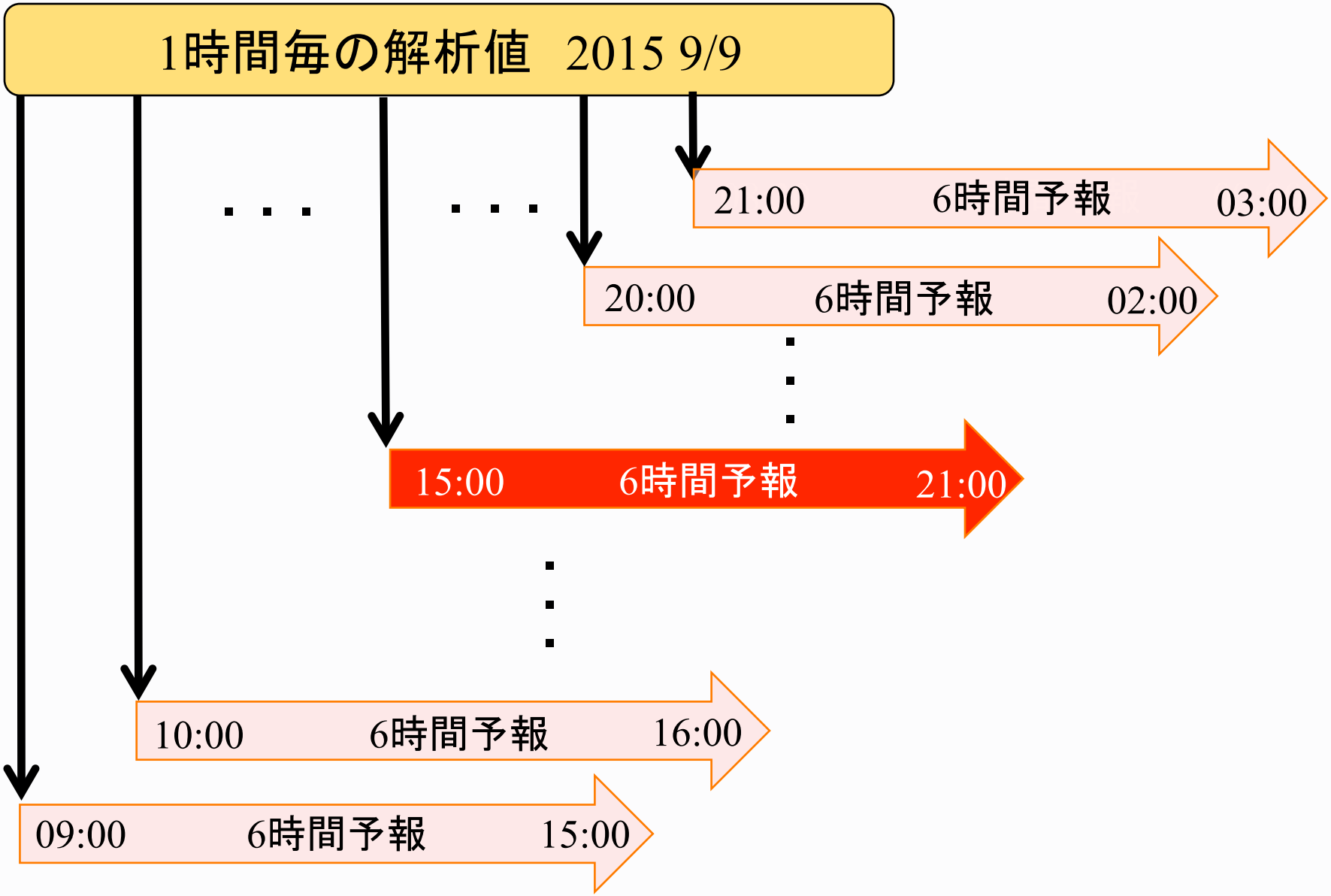
(解析値)



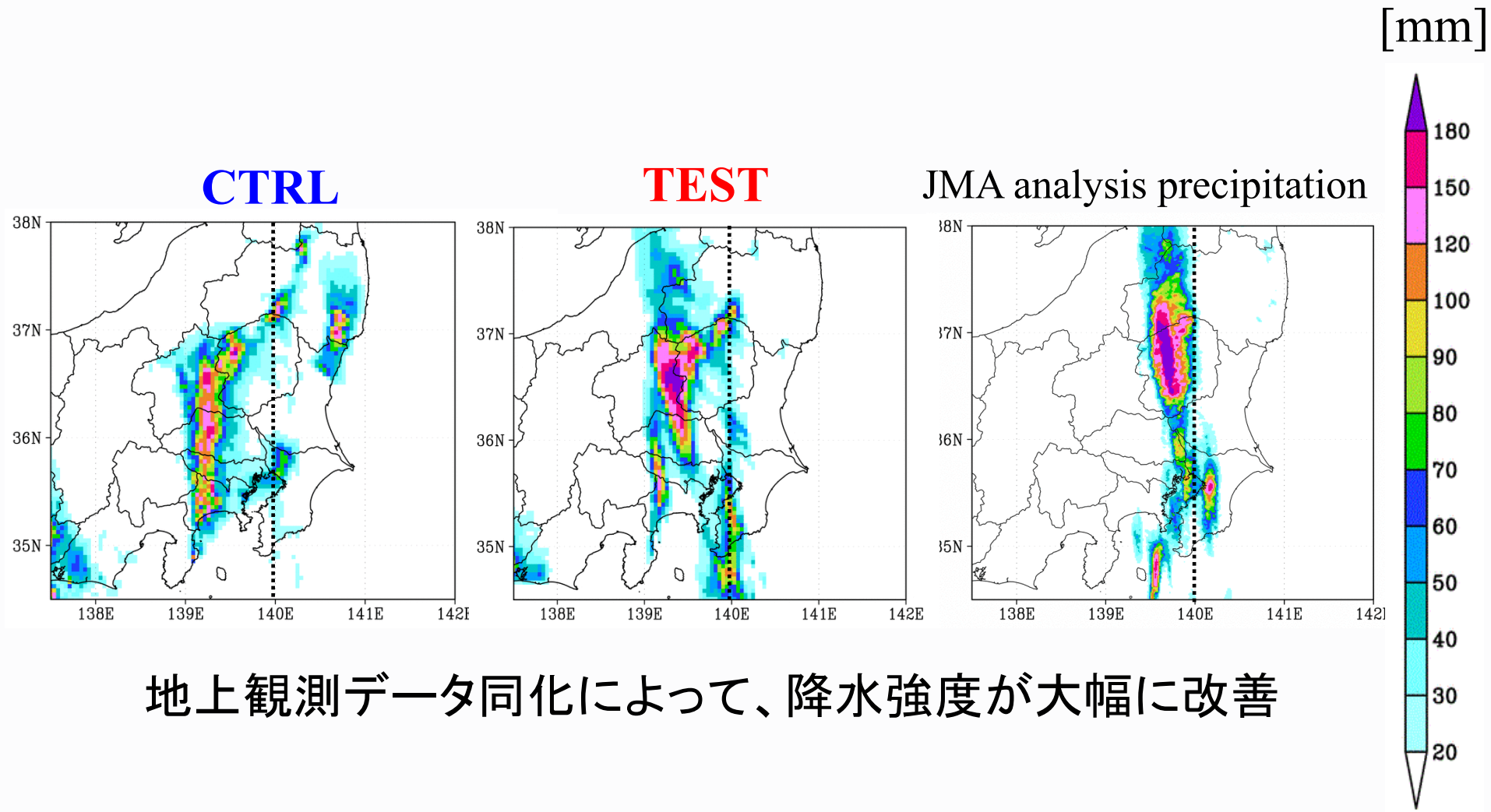
高度1.5kmの水蒸気フラックス (解析値)



4km解像度の予報実験 (13実験)

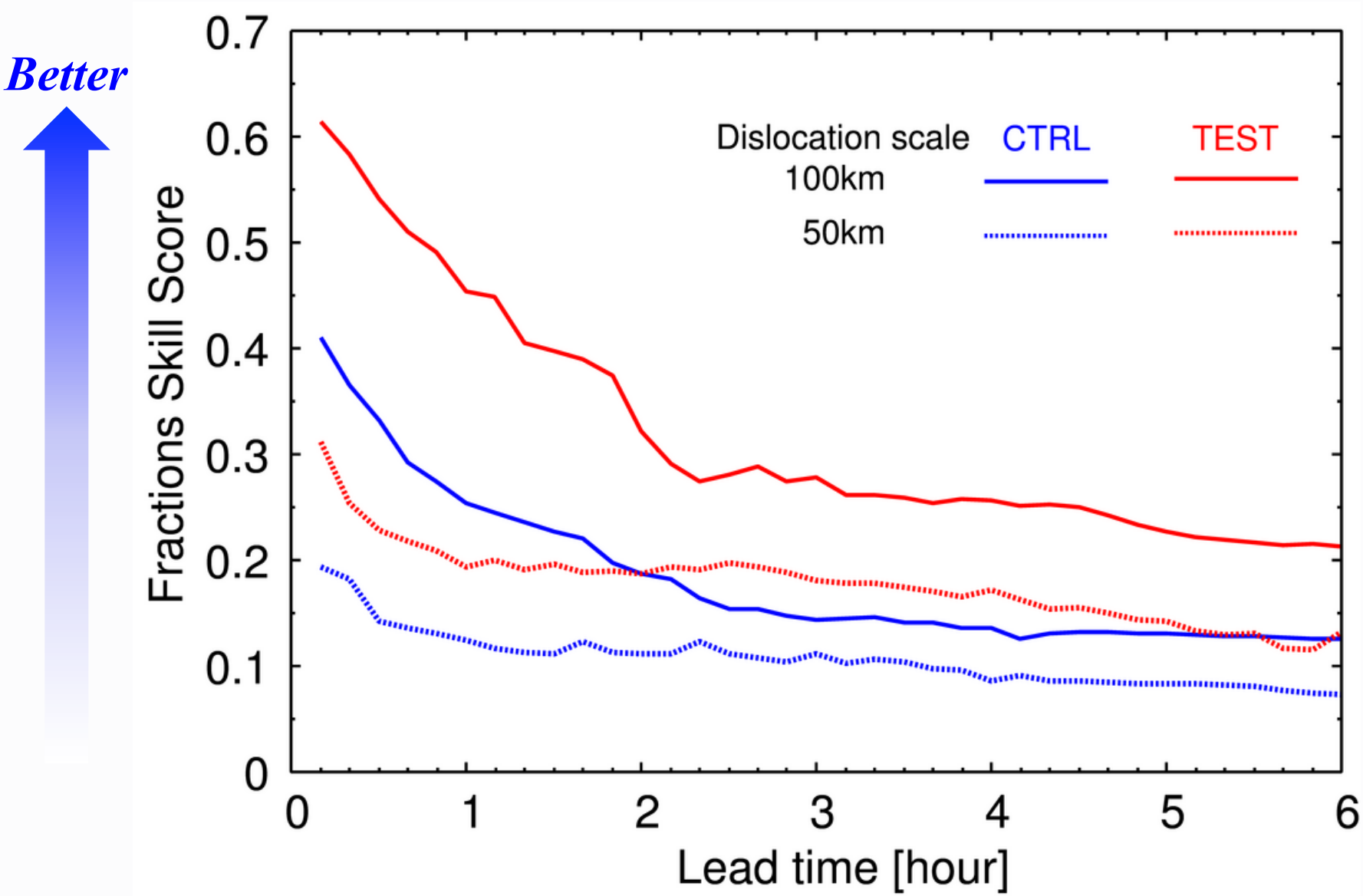


6時間積算雨量 (9/9 15JST~21JST)



地上観測データ同化によって、降水強度が大幅に改善

予報実験のフラクションスキルスコア (13実験の平均時系列図) 閾値5mm

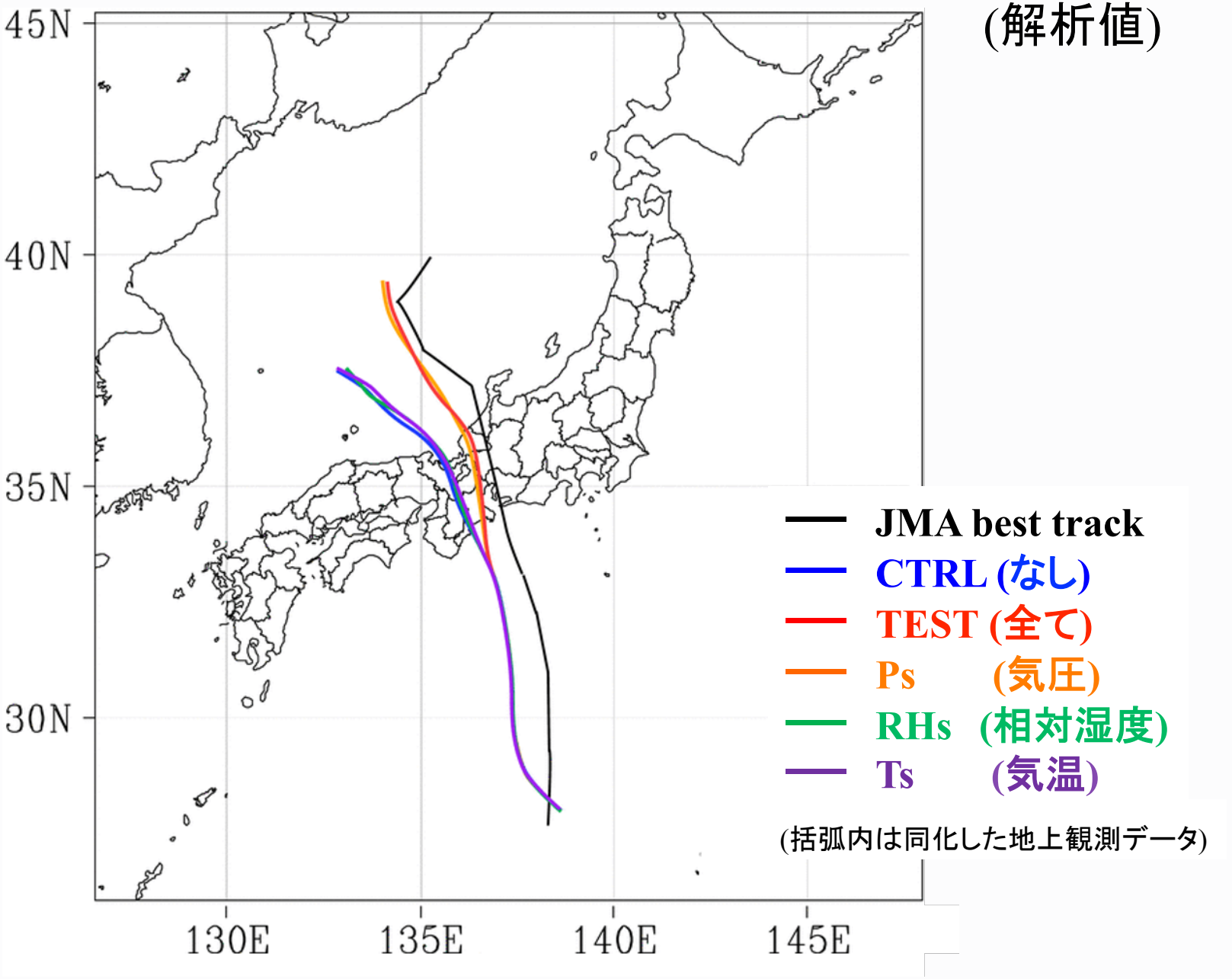


感度実験の設定

実験名	同化した地上観測要素
CTRL	なし
TEST	気圧＋相対湿度＋気温
Ps	気圧
RHs	相対湿度
Ts	気温

台風(T1518; Etau)の進路へのインパクト

(解析値)



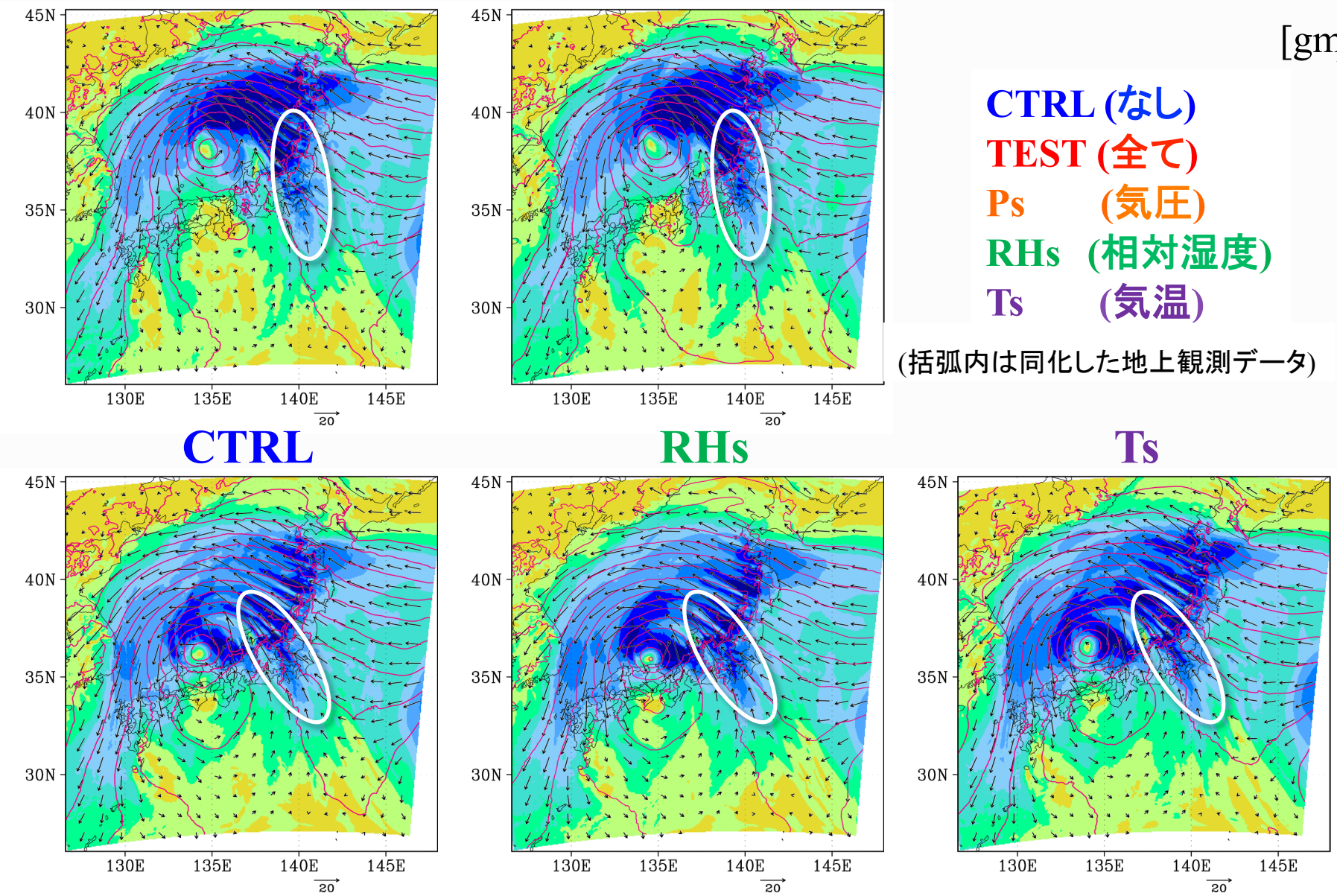
高度1.5kmの水蒸気フラックス

(9/9 21JSTの解析値)

[$gm^{-2}s^{-1}$]

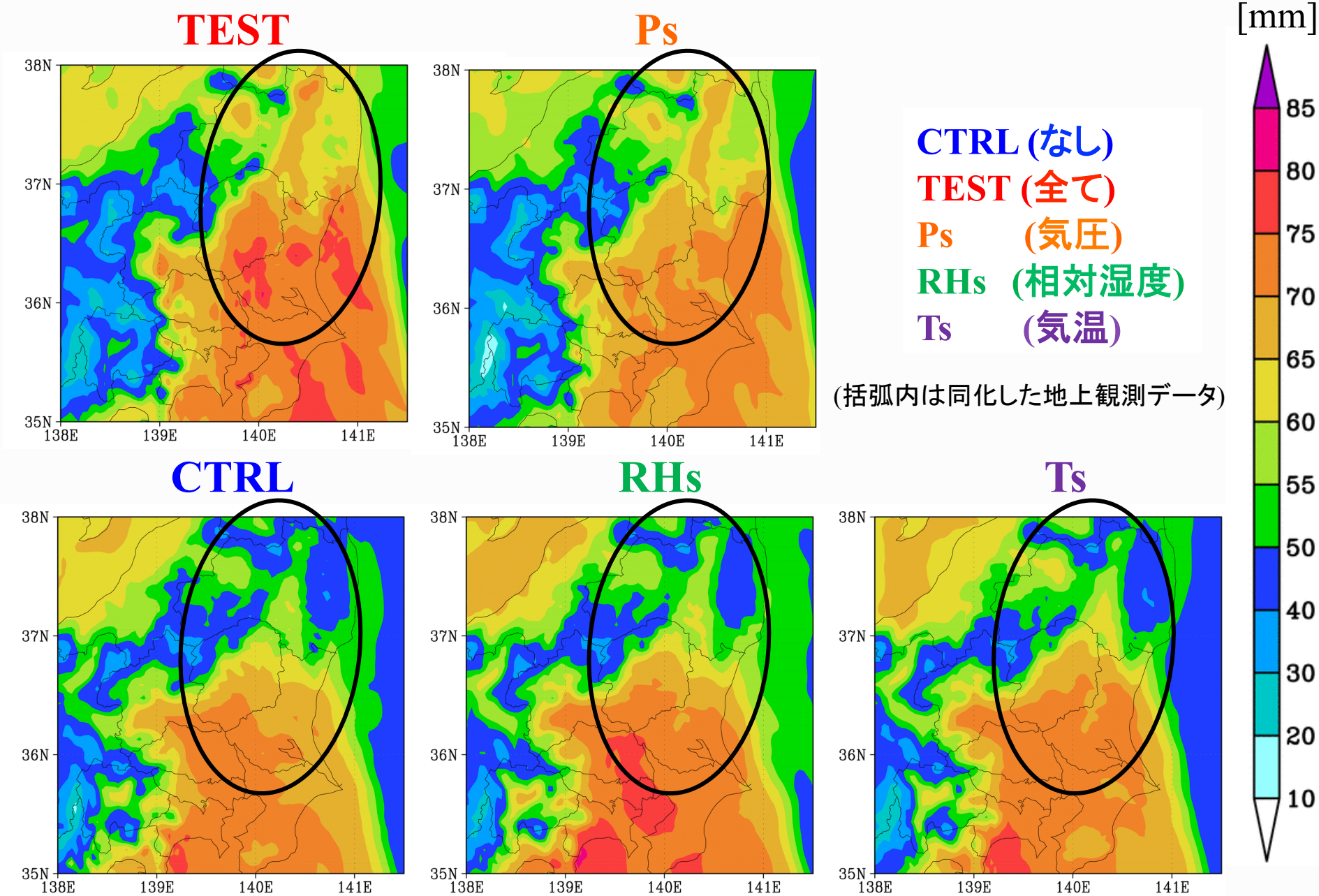
CTRL (なし)
TEST (全て)
Ps (気圧)
RHs (相対湿度)
Ts (気温)

(括弧内は同化した地上観測データ)



可降水量

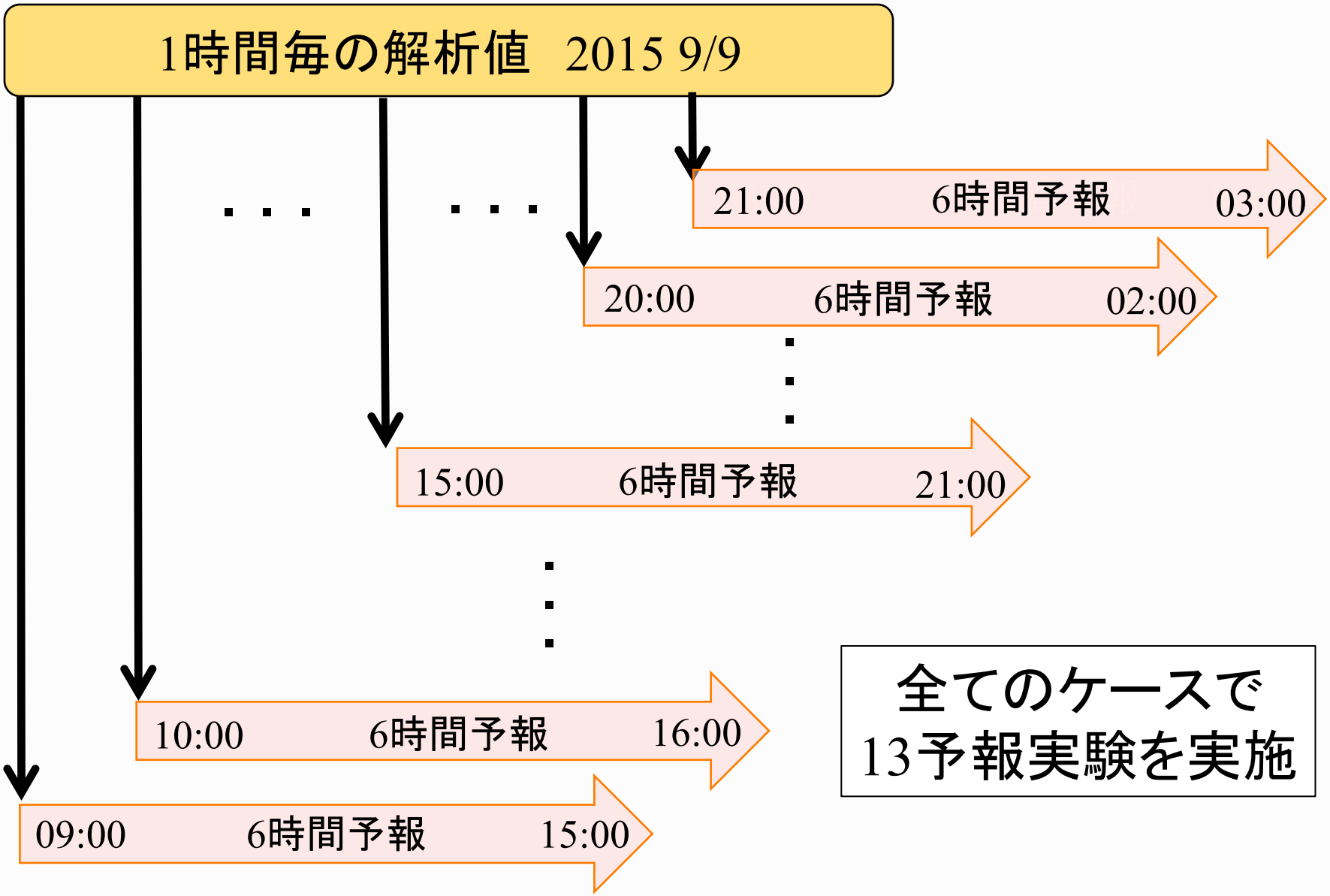
(9/9 21JSTの解析値)



CTRL (なし)
TEST (全て)
Ps (気圧)
RHs (相対湿度)
Ts (気温)

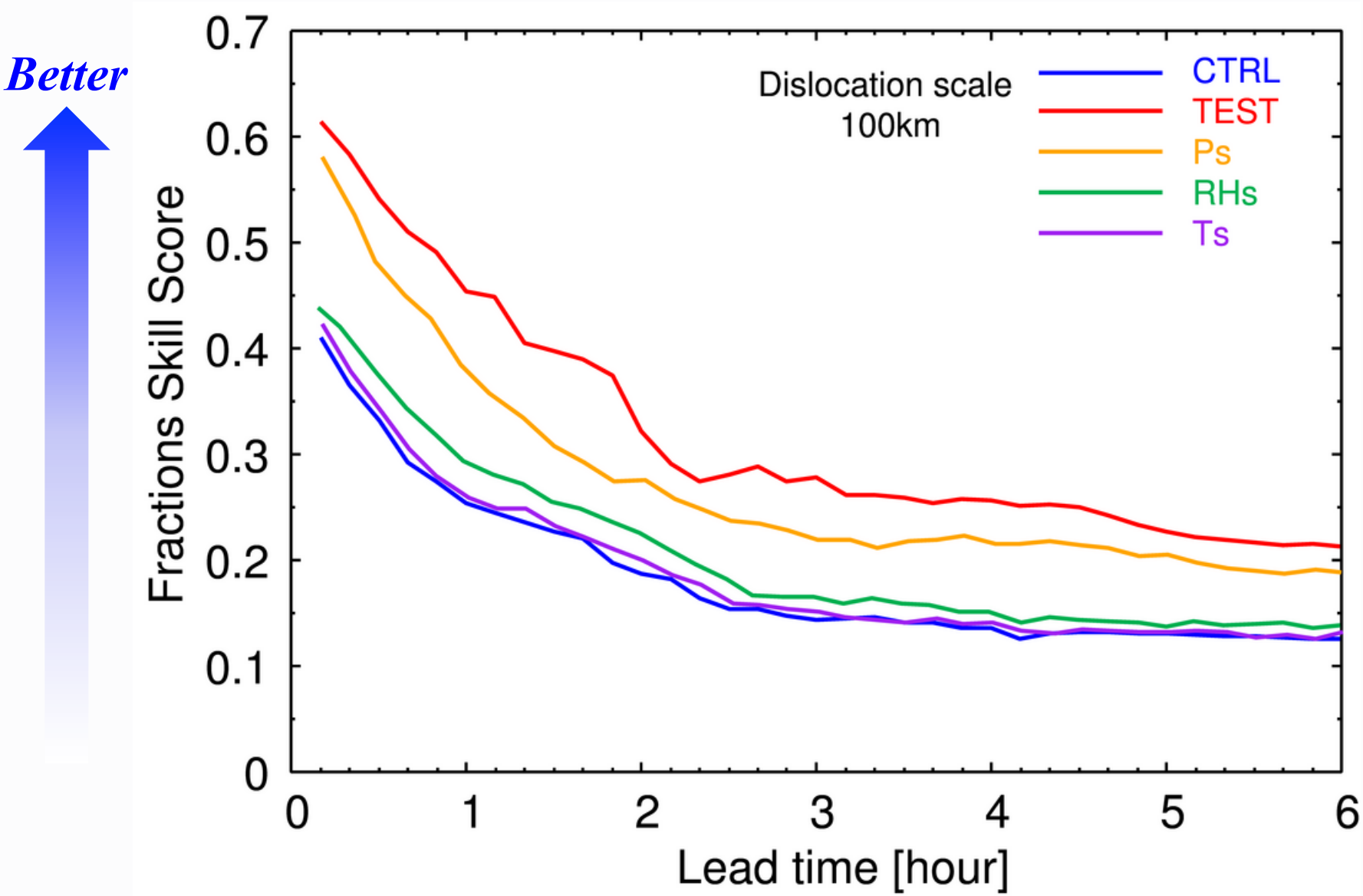
(括弧内は同化した地上観測データ)

予報実験 (13実験×5ケース)



全てのケースで
13予報実験を実施

予報実験のフラクションスキルスコア (13実験の平均時系列図) 閾値5mm



平成27年関東・東北豪雨事例における同化実験のまとめ

- 2015年9月9日の関東・東北豪雨事例を対象に、地上観測データ同化のインパクトを調べた。
- 地上観測データを同化することで、台風の進路やその周辺の大気場が改善した。
- 降水予報においても改善が見られた。

はじめに

- CREST「『ビッグデータ同化』の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」では、局地的大雨のピンポイントな予測を目指して、革新的な予測手法を開拓している。

⇒ 高頻度・高分解能な観測データ
- フェーズドアレイ気象レーダー
- ひまわり8号(スーパーラピッドスキャン)
- 稠密な地上観測網　　など

本研究の目的

- どのような観測データ（空間分布、頻度、要素など）が、局所的大雨の予測に有効か？

本研究の内容

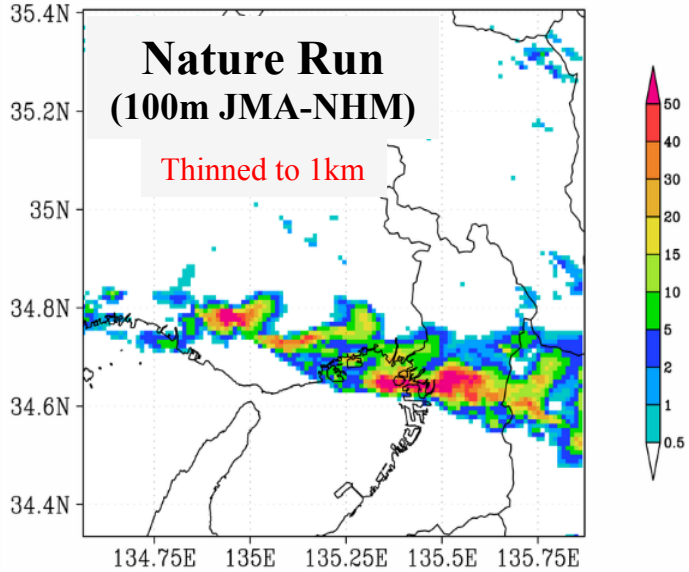
2008年7月28日に神戸市の都賀川で水難事故を引き起こした局地的大雨を対象とした、観測システムシミュレーション実験（OSSE）を行う。

- 気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を用いた100mメッシュ予報を真値（Nature run）とする
- 局所アンサンブル変換カルマンフィルター(LETKF)を用いた1kmメッシュのOSSE

(国土交通省 鳥取河川国道事務所のHP　http://www.cgr.mlit.go.jp/tottori/river/suinanboushi.html　より引用)

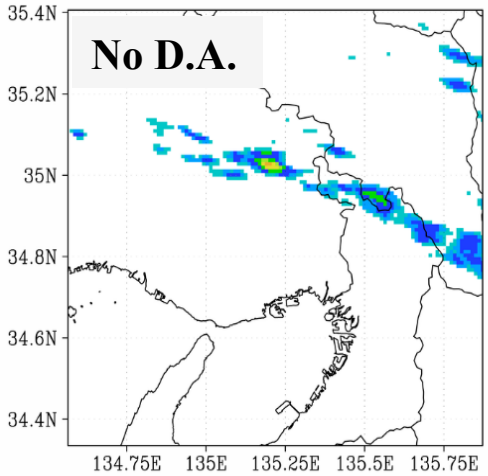
1. はじめに

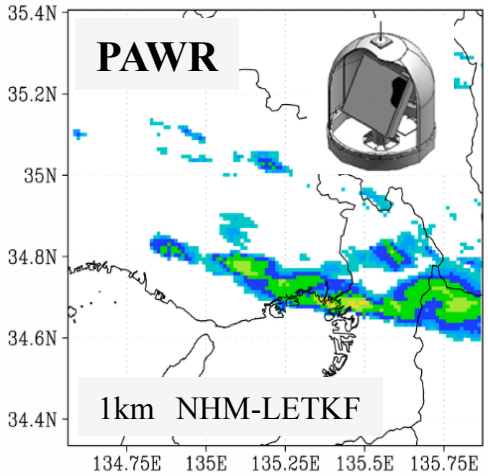
(国土交通省 鳥取河川国道事務所のHP
http://www.cgr.mlit.go.jp/tottori/river/suinanboushi.html より引用)

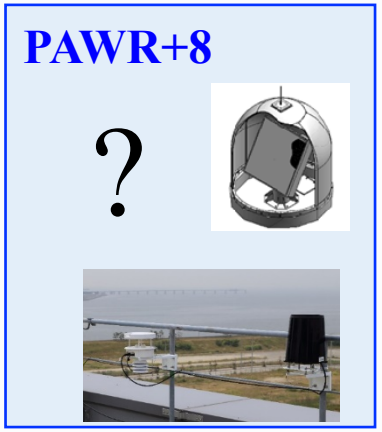


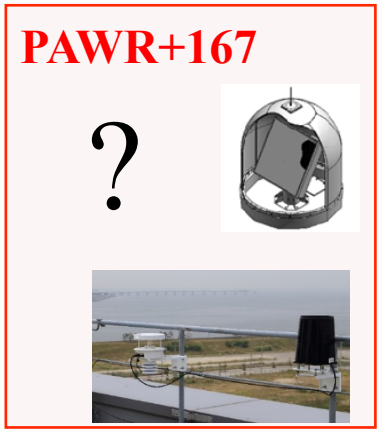
1時間積算雨量 (2008/07/28, 11:30JST～12:30JST)

OSSEの結果







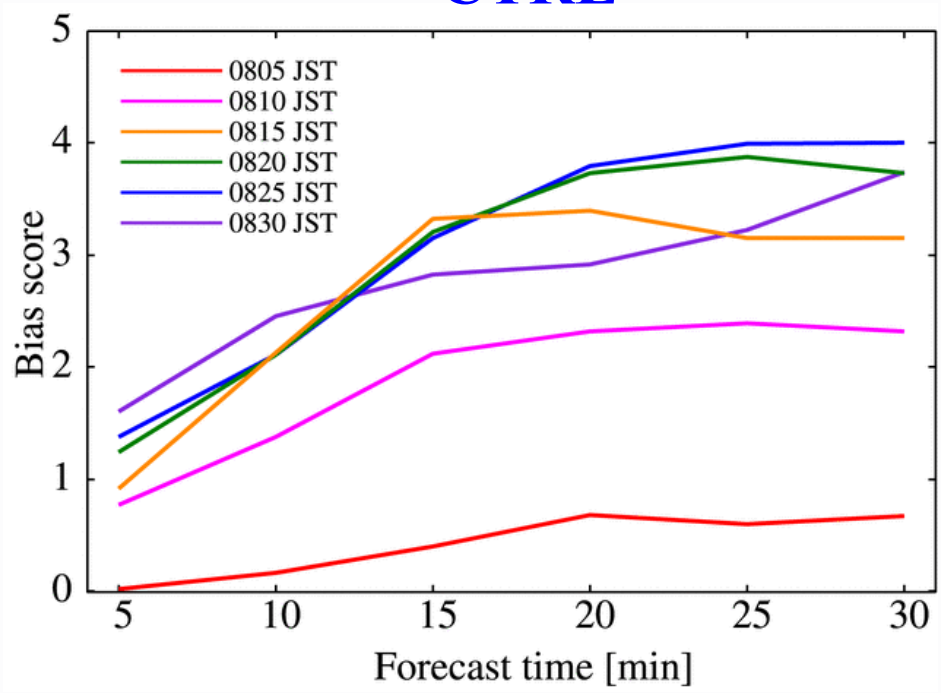


PAWR 1km, 1分毎	
要素	誤差
反射強度 [dBZ]	10 % (最小 2dBZ)
動径風 [m/s]	3 m/s

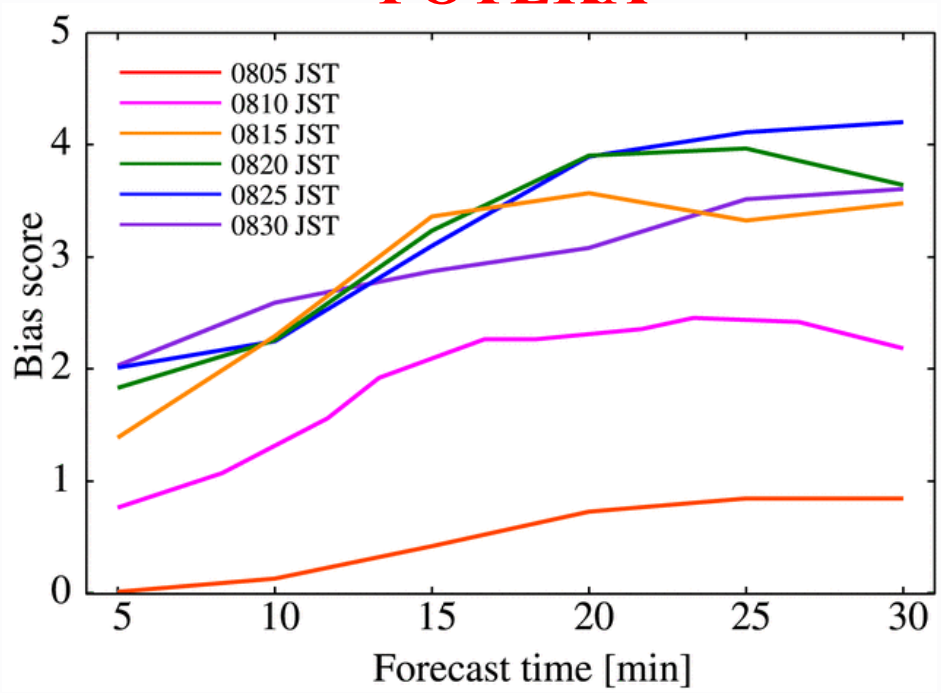
3.3 反射強度のバイアススコア

- 高度 2km
- 閾値 25dBZ

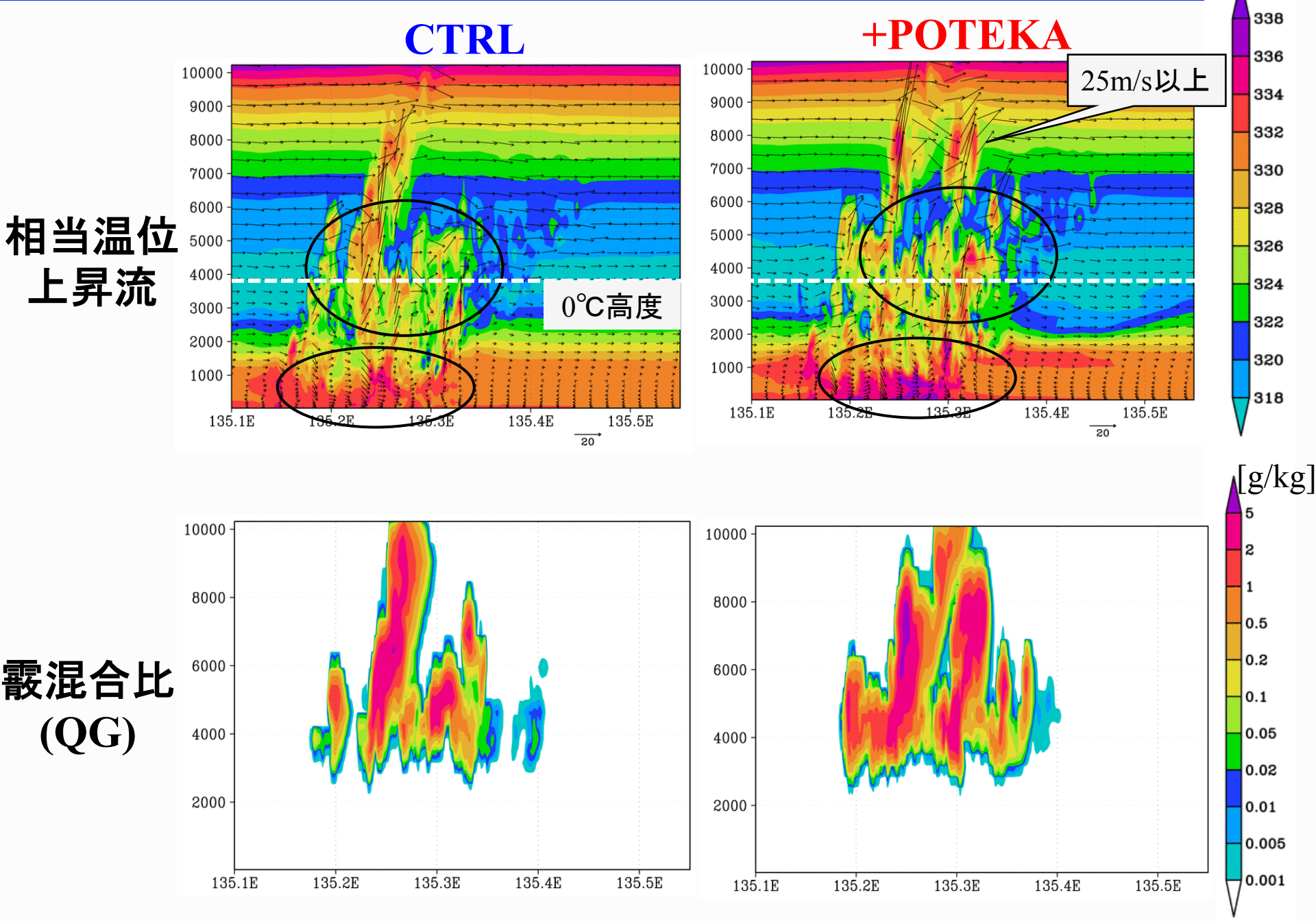
CTRL



+POTEKA



3.4 10分予報時の鉛直断面図 (初期時刻0830JST, 34.69N)



アンサンブル・カルマンフィルタ(EnKF)

カルマンフィルタによるデータ同化

$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_f))$

$\mathbf{K} = \mathbf{P}_f \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_f \mathbf{H}\mathbf{T} + \mathbf{R})^{-1}$

$\mathbf{P}_a = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\, \mathbf{P}_f$

EnKFでは$\mathbf{P}_f$をアンサンブル予報摂動$\mathbf{X}_f$で近似する。

$\mathbf{x}_a$:解析値、$\mathbf{x}_f$:第一推定値、$\mathbf{K}$:カルマンゲイン

$\mathbf{y}$:観測値、$\mathbf{H}$:観測演算子

$\mathbf{P}_f \sim \mathbf{X}_f \mathbf{X}_f^T / (m-1)$

$\mathbf{P}_a \sim \mathbf{X}_a \mathbf{X}_a^T / (m-1)$

$\mathbf{P}_f$:背景誤差共分散、$\mathbf{P}_a$:解析誤差共分散

$\mathbf{A} \sim \mathbf{X}_a \mathbf{X}_a^T / (m-1)$

xaへのアップデートの仕方、XfからXaにアップデートする方法にはいくつか種類がある。

ここでは、その一種のLETKFを用いる。

Xaはデータ同化により求まった解析値の解析誤差を代表する摂動となる。

現在、大気モデルのデータ同化で用いられている様々な手法は、基本的にこれが原点。

流れ依存の解析誤差に整合した摂動が得られる。

m:メンバー数

アンサンブル・カルマンフィルタ（EnKF）

カルマンフィルタによるデータ同化

$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_f))$

$\mathbf{K} = \mathbf{P}_f \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_f \mathbf{H}\mathbf{T} + \mathbf{R})^{-1}$

$\mathbf{P}_a = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\, \mathbf{P}_f$

EnKFでは$\mathbf{P}_f$をアンサンブル予報摂動$\mathbf{X}_f$で近似する。

$\mathbf{x}_a$:解析値、$\mathbf{x}_f$:第一推定値、$\mathbf{K}$:カルマンゲイン

$\mathbf{y}$:観測値、$\mathbf{H}$:観測演算子

$\mathbf{P}_f \sim \mathbf{X}_f \mathbf{X}_f^T / (m-1)$

$\mathbf{P}_a \sim \mathbf{X}_a \mathbf{X}_a^T / (m-1)$

$\mathbf{P}_f$:背景誤差共分散、$\mathbf{P}_a$:解析誤差共分散

$\mathbf{A} \sim \mathbf{X}_a \mathbf{X}_a^T / (m-1)$

xaへのアップデートの仕方、XfからXaにアップデートする方法にはいくつか種類がある。

ここでは、その一種のLETKFを用いる。

Xaはデータ同化により求まった解析値の解析誤差を代表する摂動となる。

現在、大気モデルのデータ同化で用いられている様々な手法は、基本的にこれが原点。

流れ依存の解析誤差に整合した摂動が得られる