

# XRAIN のアンサンブル同化によるメソ対流系発生時における 大気中下層の解析

## Using Ensemble Assimilation of XRAIN data for Analyzing Generation of the Mesoscale Convective System in Middle-Low Levels

山口弘誠・堀池洋祐<sup>(1)</sup>・中北英一

Kosei YAMAGUCHI, Yosuke HORIIKE<sup>(1)</sup> and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1)Graduated School of Engineering, Kyoto University

### Synopsis

Initial condition is difficult to determine for Numerical Weather Prediction of rainfall prediction. Data assimilation (DA) is expected to improve the initial condition in the model. This study examines the influence of the low-temperature on the generation of convective clouds. A wider region is used for assimilation in to evaluate low-temperature area in middle atmosphere. A case study in west Japan is performed for verification. As a result, the convective clouds over Rokko mountains can be predicted due to reproduction of low-temperature mass by data assimilation.

**キーワード:** Xバンドレーダー, 短時間降水予測, データ同化, 降水粒子判別, 低温域

**Keywords:** X-band radar, Short lead time rainfall prediction, Hydrometer classification, Data assimilation, Low-temperature area

### 1. 本研究の背景と目的

近年, 日本各地で線状メソ対流系による災害が頻発している. メソ対流系とは水平スケール 100km オーダーの降水システムであり, 複数の積乱雲が組織化し, 長時間同じ位置で豪雨をもたらす. 例えば, 2014 年 8 月 19 日から 20 日にかけて広島県で大規模な土砂災害をもたらした「平成 26 年 8 月豪雨」などが挙げられる. このような豪雨災害に対して, 被害を最小限に留めるためには, 高精度な降水予測情報が極めて重要である.

モデルを用いた短時間降水予測では, 最適な初期値を与えることが重要であり, データ同化は最適な初期値を与えるための有効な手法の一つであ

る. データ同化とは, 観測から得られた実測データと数値気象モデルを用いて大気のような時間発展する複雑なシステムの状態を高精度に推定する手法である. データ同化によって推定された真の状態と考えられる値(解析値)をモデルの初期値とすることで, 高精度な予測を行う.

高い時間・空間解像度を有しており, 降水の推定精度も高い気象レーダーを用いたデータ同化研究は進められている. 近年レーダー観測技術の発展に伴い偏波レーダーが開発され, 国土交通省は 2010 年から X バンド MP レーダー(マルチパラメータドップラーレーダー)を全国に配備している. この偏波レーダーは降水粒子の形状に関する特性を捉えることが出来る. 山口ら(2013)は, 近畿地

方4基の国交省Xバンド偏波ドップラーレーダーネットワーク(XRAIN)を用いて固相降水粒子である霰混合比  $q_g$ , 氷晶混合比  $q_i$ , 雪片混合比  $q_s$  を推定する手法を開発した。

現在, 線状メソ対流系の初期の同化による発達予測はある程度成果が出始めているが(山口ら(2017)), 気象レーダーを用いたデータ同化によるメソ対流系の発生段階の予測に取り組んだ既往研究はほとんどない。本研究では, 中国地方4基・近畿地方4基のXRAINから得られるレーダー反射強度  $Z_{HH}$  から推定した雨水混合比  $q_r$ , 偏波レーダーから推定した固相降水粒子混合比を同化することでメソ対流系の発生段階における予測精度向上を狙う。

## 2. 事例解析とデータ同化の狙い

### 2.1 2012年7月15日京都・亀岡豪雨の概要

本研究では, 2012年7月15日に京都, 亀岡で起きた豪雨事例を対象事例とする。紀伊水道から下層大気に暖湿流が流入し, 雨滴の蒸発によって中下層が低温化した層状雲が侵入したことにより対流不安定な場が形成された。14日23:50に最初の積乱雲が発生し, 対流不安定な場が維持されたことにより, その後も六甲山から次々と積乱雲が発生することによりメソ対流系を形成した。この豪雨の影響で, 京都市では床上浸水44棟, 床下浸水56棟などの住宅被害が発生した。

### 2.2 気象庁レーダーによる解析

六甲山域から積乱雲が次々と発生した原因を探るために, 気象庁のCバンドレーダーを用いた降水強度の結果を示す。本事例では, 山口ら(2016)と比較して, より広い範囲の降水状況を確認するため, XRAINではなく気象庁のレーダーを用いた(Fig.1)。14日18時30分から20時30分にかけて山口県沖に豪雨が見られ, その降水域は時間を追うごとに強度が弱くなりながら東進している様子が読み取れる。雨雲の中で雨滴の蒸発が起きており, その蒸発によって中下層の大気が低温化したと考えられる。

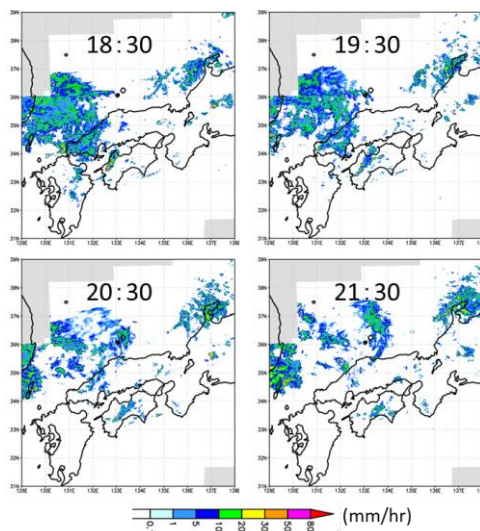


Fig.1 Surface precipitation (JMA radar).

### 2.3 メソ対流系発生の要因

大気中下層の低温域の東進について評価を行うために, メソ客観解析データから算出した700hpa高度の気温を示す(Fig.2)。14日21時に広島, 岡山にある低温域が東進し, 15日00時に大阪湾付近に到達している様子が読み取れる。また, 相当温位と飽和相当温位の鉛直プロファイルを見ると(Fig.3), 14日21時から15日00時の自由対流高度が約1700mから約1300mに低下していた。

これは低温域が15日00時ごろに六甲山付近に到達したために, 六甲山付近の自由対流高度が下がり大気不安定な状態になったと考えられる。

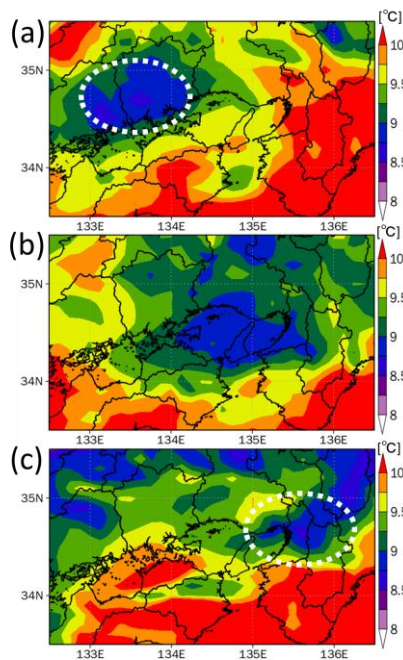


Fig.2 The temperature at 700hpa calculated from JMA-mesoscale analysis data. (a)July 14, 21:00 (b) July 15, 0:00 (c) July 15, 03:00

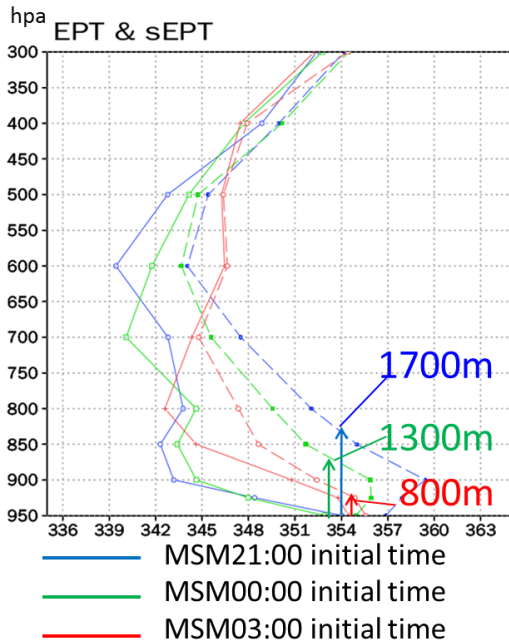


Fig.3 The emagram at Mt. Rokko (dot line is saturated potential temperature, solid line is potential temperature, arrow is Level of Free Convection).

#### 2.4 CReSS と GPS 観測との可降水量の比較

今回の豪雨事例は紀伊水道からの湿舌がメソ対流系のトリガーの1つであった。そこで、大気中の水蒸気量がモデル内で十分に再現できているか検証するために、モデルと観測データから算出した可降水量との比較を行った。可降水量とは、地表のある面を基点としてその上空の大気を大きな鉛直の柱と考え、そこに含まれる水蒸気や雲が全て凝結して地上に落下した時の降水量である。

本実験で使用する気象モデルとして、本研究では名古屋大学と(財)高度情報化学技術研究機構が共同で開発した CReSS(Cloud Resolving Storm Simulator, Tsuboki and Sakakibara, 2002)を用いる。CReSS の設定として、初期時刻を14日21時、MSM 予想の水平風、気温、相対湿度のデータを、海面水温は気象庁 NEAR-GOOS データを用いた。水平解像度は1km、鉛直解像度は平均250mとした。

14日22時において、CReSS が算出した可降水量が GPS 観測から算出した可降水量より高い値を示している(Fig.4)。この結果から、水蒸気量は、観測データと比較して、CReSS から算出したが水蒸気量を過小に評価していないことが確認できた。つまり、今回の事例では、他の環境場に注目して同化実験を行うこととする。

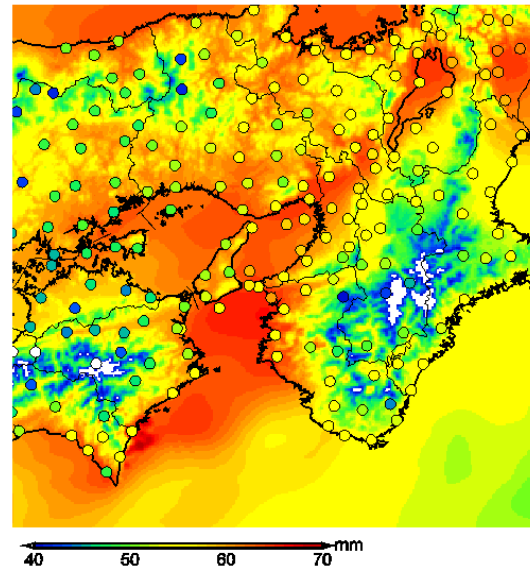
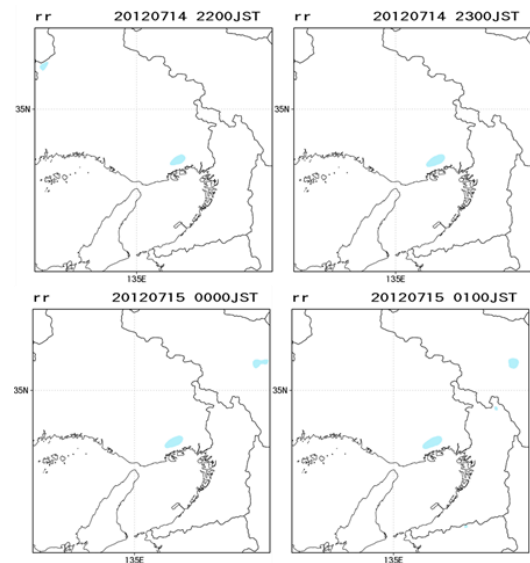


Fig.4 Comparison of precipitable water vapor (circle marks are PWV calculated from GPS observation, background color is PWV calculated from CReSS).

#### 2.5 CReSS による予測

レーダー情報を利用したデータ同化を行う前に、データ同化をしない場合の予想精度を検証した。

CReSS の設定として、初期時刻を14日18時、MSM 予想の水平風、気温、相対湿度のデータを、海面水温は気象庁 NEAR-GOOS データを用いた。同化なしの予測(CTL)では、六甲山の上空に弱い降水が常にみられるが、六甲山から新しい積乱雲が発生することはなかった(Fig.5)。18時を初期値とした40メンバー全ての降水強度の予測結果も同様に六甲山から積乱雲が発生することはなかった。CTL、アンサンブル予測ともに降水強度が実際に観測された降水と比較して、過小に予測されていた。



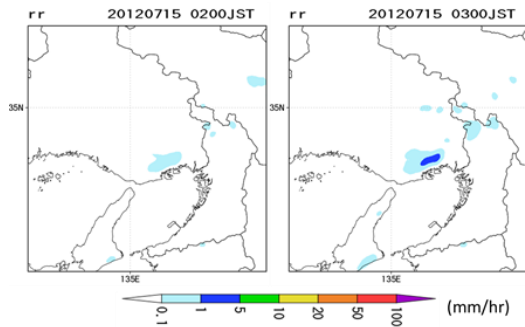


Fig.5 Surface precipitation (CTL).

### 3. 同化システム

#### 3.1 雲解像データ同化システムCRESS-LETKF

XRAIN から得られる情報を雲解像モデルに同化するためのデータ同化手法として、Yamaguchi and Nakakita(2008)が構築した雲解像データ同化システム CReSS-LETKF を用いる。雲解像モデル CReSS にデータ同化手法 LETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter, Hunt et al., 2007)を組み込んだシステムである。

この手法は広義のアンサンブルカルマンフィルタ法の一つであり、アンサンブル予報とカルマンフィルタを融合させた同化手法である。カルマンフィルタは誤差の時間発展を予報するデータ同化手法であり、そこにアンサンブル予報が提供する予報のばらつきの情報を利用する。LETKFは、大気力学系の特徴である局所低次元性を前提としたいくつかの過程を施して計算効率を高くしたアンサンブルカルマンフィルタの一つである。

#### 3.2 初期アンサンブル生成手法 BGM 法

本研究ではアンサンブル生成手法として Toth and Kalnay(1993,1997)の Bred growing modes 法(BGM 法)を用いた。BGM 法とは、過去から予報開始時間までの間に大きさを小さくすることを繰り返しながら発展させた摂動を予報開始時刻の解析値に与えて初期アンサンブルメンバーを作成する手法である。本実験では、BGM 法を用いて 14 日 18:30JST において 40 メンバーを作成した。

## 4 メソ対流系発生の予測

### 4.1 同化実験の方針

山口ら(2016)は、メソ対流系が発生した原因の一つとして、中下層の低温化の気塊が六甲山上空を通過した際に大気不安定をもたらしたと考え、メソ客観解析の気温データをメソ対流系発生前にあ

たる 23:00-23:45 に同化した。同化することにより、中層が低温化し、自由対流高度が 2,200m から 1,600m に急激に低下した。1 回目の同化直後(23:00)に積乱雲が発生していることがわかる(Fig.6)。この結果から、中層の気温の低温化が本事例においては積乱雲の発生原因の一つであることが示された。

そこで、XRAIN の同化による大気場の修正に着目し、メソ対流系を構成する最初の積乱雲発生前の期間に同化を終了させ、初期の積乱雲群の発生を試みた。結果として、六甲山系中層の温位低下と水蒸気混合比の増加を確認したが、対流不安定になるほどの気温低下は起こらず、強いメソ対流系を発生させるには至らなかった。同様に GPS 観測から得た水蒸気データの同化も行ったが、メソ対流系の発生には至らなかった。

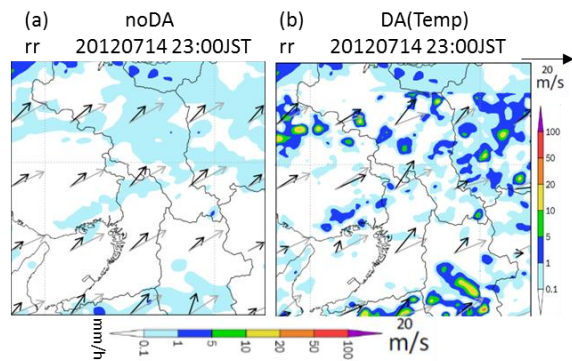


Fig.6 Surface precipitation (a)noDA,(b)DA.

本研究では、六甲山でメソ対流系が発生する約 5 時間前に山口県で降り続いた降水が蒸発しながら東進し、中下層の低温化をもたらしていると考え、同化する時間帯をメソ対流系が発生する時間帯から大幅に早めた。山口県で降り続いた降水の情報を取り込むため、同化領域を山口県が含まれるように西側に広く取った。山口県沖から東進する雲をターゲットにして同化を行うことにより、中下層の低温化を引き起こし、メソ対流系初期の降水予測の精度を向上させることを目指す。

### 4.2 実験設定

CReSS の設定について述べる。水平解像度を 1km、鉛直解像度は平均 250m、初期アンサンブル摂動は BGM 法を用いて 40 メンバー作成した。計算領域と同化領域は Fig.7 のとおりである。格子数は緯度方向に 733 格子、経度方向に 403 格子とした。

同化期間は 14 日 18:30-20:30 として、5 分毎に同化を行った。雨水混合比  $q_r$  とドップラー風速  $V_r$ ,



そして霰混合比  $q_s$ , 氷晶混合比  $q_i$ , 雪片混合比  $q_s$  の全ての固相降水粒子混合比の観測値を同化した。本実験では、0 値の同化は行っていない。

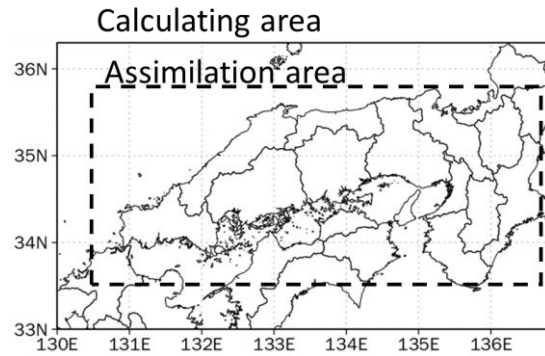


Fig.7 Calculating area (solid line), Assimilation area (dot line).

#### 4.3 同化期間内の検証と解析

まず、同化による効果を確認するために、同化期間中の温位(Fig.8(a))と水蒸気混合比(Fig.8(b))を示す。同化直後(18:30)に中下層の温位が低下し、水蒸気混合比が増加した。これは雨滴が蒸発して水蒸気が増加し、潜熱により気温が低下したためであると考えられる。すなわち、この結果から中下層域において雨滴の蒸発による気温低下という機構が再現できたと考えられる。時間が経過するにつれて、低温化した領域が東進している様子も読み取れる。

#### 4.4 予測結果

同化期間終了後 14 日 20:30 から予測時間の解析を行った。

##### 4.4.1 高度約 1,800m における温位差

同化期間後の中下層における低温域の東進について解析を行う。高度約 1,800m における温位差を示す(Fig.9)。低温域は時間の経過に伴い、東に移動して 15 日 1 時に六甲山域に到達した様子が読み取れる。15 日 1 時頃に低温域が六甲山域に到達した直後に対流セルが発生した。

同化をしていないメンバーでは対流セルが発生していないことを考慮すると(Fig.10(a)), 同化することによって再現した中下層の低温域が六甲山に到達したことにより、六甲山域において 850hpa 高度の気温の低下が起きて自由対流高度が低下して、対流不安定な状態になったからだと考えられる。今回の同化実験では、18:30-20:30 の期間に山口県沖の雨雲の情報を同化することにより、同化してから約 4 時間半後に 40 メンバー中 7 メンバーで六甲山から対流セルを発生させることに成功し

た。

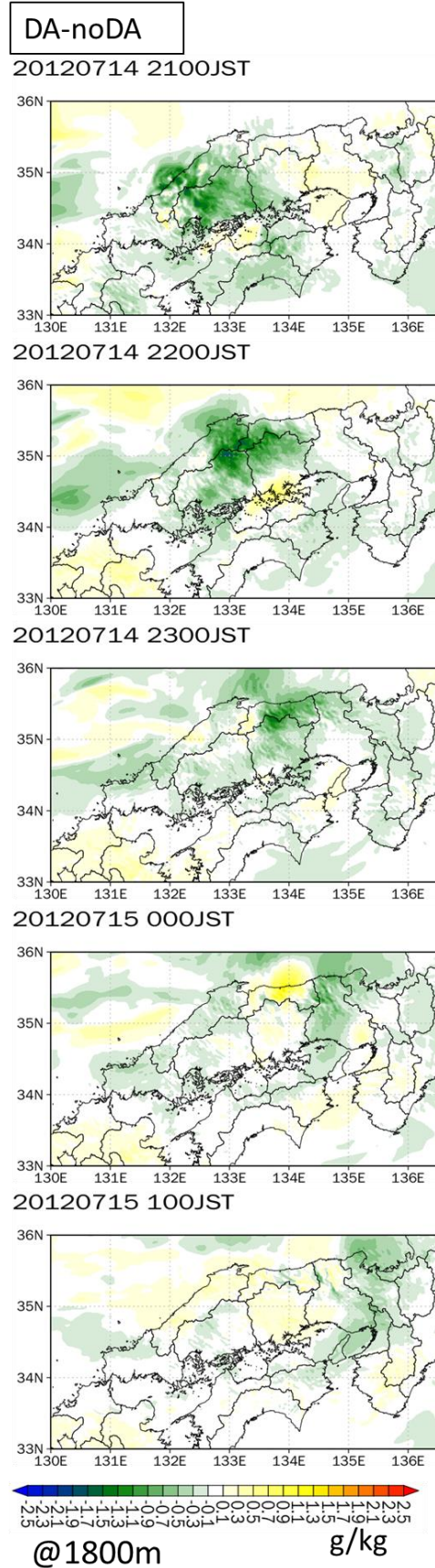


Fig.9 The difference of potential temperature between the average of DA and the average of noDA

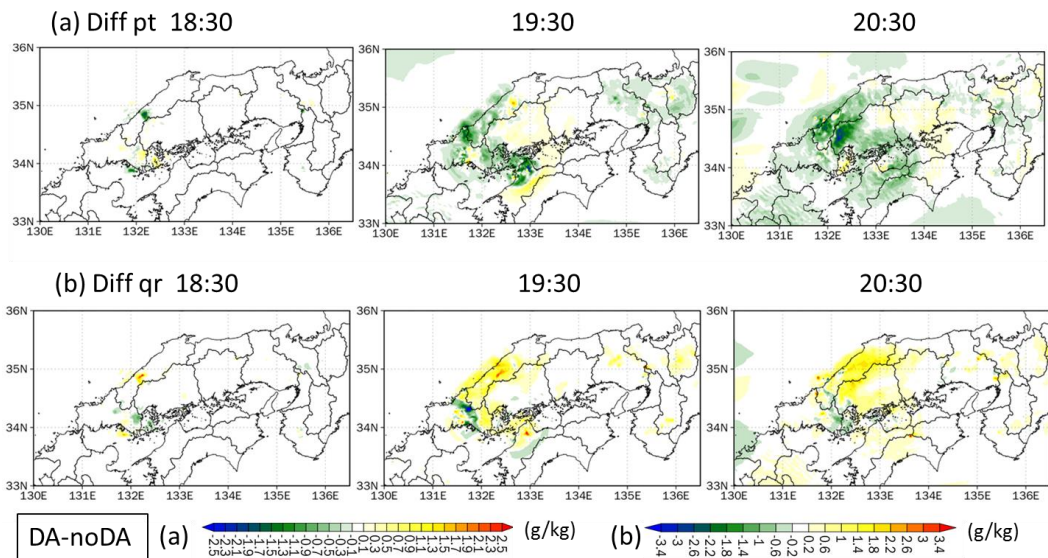


Fig.8 The difference between the average of DA and the average of noDA.

(a) potential temperature, (b) water vapor mixing ratio

#### 4.4.2 アンサンブルメンバーの解析

全アンサンブルメンバーの中でも、特に対流セルが断続的に生成していたアンサンブルメンバー (Num37) について考察する。Num37 では同化なしでは対流セルが発生していないが (Fig.10(a)), 同化を行うことにより、15日1時から4時にかけて断続的に対流セルが発生した (Fig.10(b)).

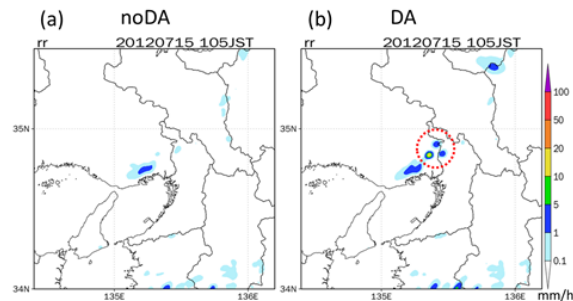


Fig.10 Surface precipitation (a)noDA,(b)DA.

Num37 はアンサンブル平均と比較して、中下層において1度以上気温が低下している様子が確認できる (Fig.11). 中下層が低温化したことにより、自由対流高度が低下したために、他のアンサンブルメンバーより対流不安定な状況であった (Fig.12). 15日1時において、アンサンブル平均では自由対流高度が2,000m付近であるのに対し、num37では1,000m以下であった. 六甲山の標高が約900mであることを踏まえると、空気塊が非常に持ち上げられやすい状況であった.

Num37は、低温域が六甲山付近に到達した直後に対流セルが発生していたことも確認することが

できた. すなわち、東進してきた低温域が対流活動を開始させるトリガーの1つであったことがわかった.

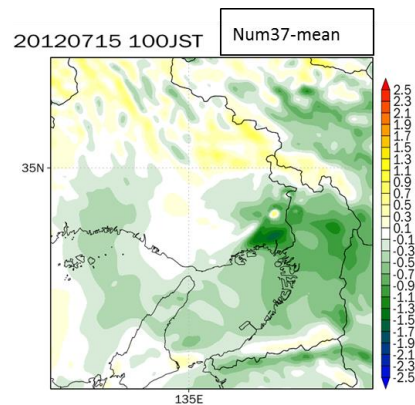


Fig.11 The difference of potential temperature between the average of all members and the num37.

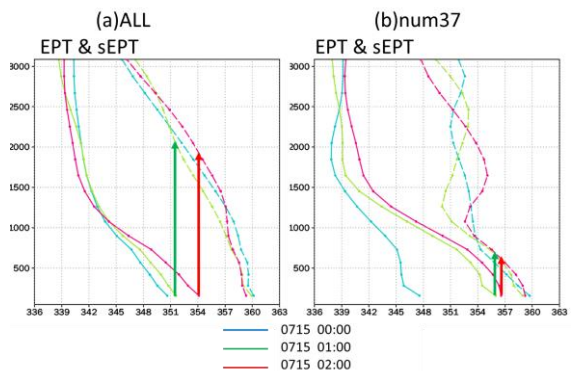


Fig.12 The Emagram at Mt.Rokko

(a) The average of all members, (b) num37

## 5. 結論

本実験では、初期のメソ対流系をモデル内に発生させるため、同化期間を最初の積乱雲が発生する約5時間前の18:30から同化を行った。その結果、XRAINの同化によって中下層で低温化が起り、その低温域が東進して六甲山域に到達するタイミングで40メンバー中の7メンバーに対流セルを発生させることに成功した。対流セルが発生したメンバーはアンサンブル平均と比較して、中下層の低温化に伴い自由対流高度が低下し、対流不安定な状態であったことがわかった。

今後は、雲微物理モデルスキームの改善による予測精度の向上や、アンサンブル予測情報の有効な利用手法の検討について考察していく。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、国土交通省 XRAIN のデータは、国土交通省・河川砂防技術研究開発のコンソーシアム研究を通じて提供いただいた。

本研究はJSPS 科研費 15H05765 (基盤研究 S「ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測と豪雨災害軽減に向けた総合研究」, 研究代表者: 中北英一) の助成を受けたものです。

ここに謝意を表します。

### 参考文献

黒川和誠・平野竜也・風早範彦・原田都奈生・西川哲也・岩本久雄: 2012年7月15日の大雨事例解析, 大阪管区気象台近畿地区研究会, 2012.

山口弘誠・古田康平・中北英一: 偏波レーダーから推定した定性的降水粒子情報の雲アンサンブル同化, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp. 369-377, 2013.

山口弘誠・古田康平・中北英一: 偏波ドップラーレーダーの同化によるメソ対流系の降水予測精度向上に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第59号B, pp. 298-322, 2016.

山口弘誠・古田康平・中北英一: XRAIN を用いたアンサンブル同化による線状降水帯の維持と発生予測, 土木学会論文集 B1(水工学), 73 巻, pp.I\_211-I\_216, 2017.

Hunt, B. R., Kostelich, E. J. and Szunyogh, I.: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, Vol. 230, pp.112-126, 2007.

Tsuboki, K., and A. Sakakibara: Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator, *High Performance Computing*, Springer, pp.243-259, 2002.

Yamaguchi, K., and E. Nakakita: Ensemble Kalman Filter Assimilation of Doppler Radar Data Using the Cloud-Resolving Non-hydrostatic Model with an Aim to Introduce Polarimetric Radar Data Assimilation, Proc of 7th International Symposium on Weather Radar and Hydrology, 3pp, 2008.

Zoltan Toth and Eugenia Kalnay: Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 125, pp.3297-3319, 1997.

(論文受理日: 2017年6月13日)