河川技術論文集，第23巻，2017年6月

XRAINデータの活用による局地的豪雨に対する数値予測の精度向上の評価 -2014年広島豪雨を対象として-

EVALUATION OF PREDICTION ACCURACY OF WRF COUPLED WITH XRAIN DATA ASSIMILATION FOR TORRENTIAL RAIN FALL IN HIROSHIMA IN 2014

北　真人[1]・河原能久[2]・Cho Thanda NYUNT[3]
Masato KITA, Yoshihisa KAWAHARA and Cho Thanda NYUNT

[1]学生会員　工（修）　広島大学大学院博士課程後期　工学研究科社会基盤環境工学専攻
（〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1）
[2]フェロー会員　工博　広島大学大学院教授　工学研究科社会基盤環境工学専攻（同上）
[3]正会員　工（博）　日本工営株式会社　中央研究所（〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）

While short-time forecasting using XRAIN data has been developed in recent years, mesoscale weather predictions with XRAIN data assimilation have been limited. This study discusses how and to which extent the prediction accuracy of WRF (Weather Research Forecasting model) can be enhanced with XRAIN data assimilation for the torrential rainfall in Hiroshima city. The predicted results show that data assimilation leads to significant improvement in the location of linear rainbands, since the data assimilation successfully induces the favorable environmental conditions for convective rainfall. It is clearly shown that the analysis cycle of 10 minutes produces better results than those at 30 minute interval and an hour interval. It is also clarified that the assimilation of XRAIN data at only lower angles does not improve the prediction accuracy because cumulonimbus clouds developing in upper layer can be well captured with the radar data at higher angles.

Key Words : *Torrential rainfall, X-band MP radar, WRF, 3-D variational method*

1．序論

近年，日本各地において気候変動に伴う局地的豪雨が多発する傾向にある．とりわけ，急流河川や急傾斜地を多く有する地域において，洪水氾濫や土石流といった災害に見舞われるリスクが今後更に高まることが懸念される．この対応策の一つとして，降雨観測の高度化とその応用が急務となっている．国土交通省では，平成22年よりXRAINと称されるX-band MPレーダーシステムを運用している．X-band MP レーダーは従来の国交省C-band レーダーと比較して，時空間的に高分解能な降雨観測を実施している．とりわけ，ボリュームスキャン機能を有していることから，鉛直方向のデータが取得可能となっており，三次元的な降水観測が実現可能となっている．

現業におけるXRAINデータの活用事例として，気象庁の降水ナウキャストが挙げられる[1)]．この手法では，降水分布を3次元的に追跡する手法と対流モデルを用いた予測を組み合わせることで，従来よりも確度の高い予測情報を提供している．ただし，このような手法のリードタイムは１時間程度と短い[2)]．また，渦度解析による降水セルの検知[3)] など，ドップラー速度を活用した初期予測に関する研究も盛んに行われている．

また，長期的なリードタイムを有する手法として数値モデルによる予測が挙げられる．しかし，その予測精度は初期場に大きく依存することがよく知られている[2)]．この問題の解決策として，降水の発生に重要となる風速と水蒸気の情報を観測したレーダーデータの同化を用いて同化することが有効とされている[4)]．とりわけ，本研究で対象とするような局地的豪雨は現象の時空間スケールが小さいことから，X-band MP レーダーのような時空間的に密な観測データを活用することで予測精度が向

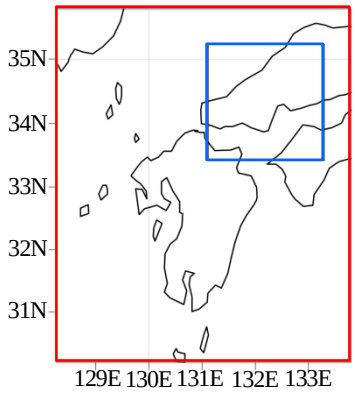


図-1 計算領域（赤枠：d01，青枠：d02）

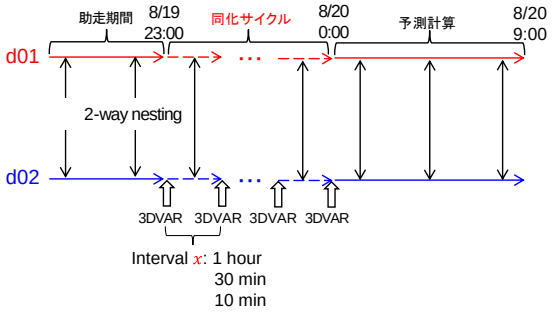


図-2 同化サイクルの概念図

上することが期待される．他面，X-band MPレーダーを同化に利用した研究事例は限られており[5]，XRAINデータを活用した数値予報システムの進展が望まれる．そこで，本研究では，XRAINデータを活用した数値予測システムの確立を目的として，既往の研究に引き続き[6]，2014年広島豪雨に対してXRAINデータを同化した数値モデルの予測精度の評価を行った．とりわけ，本研究では，観測データの時空間的な変化が予測精度に与える影響について評価を行った．

2．数値予測の概要

(1) 気象モデル（WRF）の概要

本研究では気象モデルWRF-ARW ver. 4.3.1を使用した．基礎方程式は，連続式，運動方程式，気体の状態方程式，温位保存式，ジオポテンシャル式，相別比湿保存式であり，これらを連立させて解くことによって大気の現象を数値的に表現する．本研究でWRFを使用した理由は，WRFが非静水圧モデルでありメソスケール気象に対応できるモデルであること，また，雲物理過程，放射過程，降水過程，接地境界層における様々な物理モデルを選択できることにある．

表-1 計算条件

	d01	d02
Grid number	100×120×60	196×196×60
Grid resolution(km)	5	1
Time step(sec)	25	5
Integration time	2014/8/20 0:00 - 2014/8/20 9:00(JST)	
Land surface model	Noah Land Surface Model	
Planetary boudary scheme	YSU scheme	
Microphysics	WSM6	

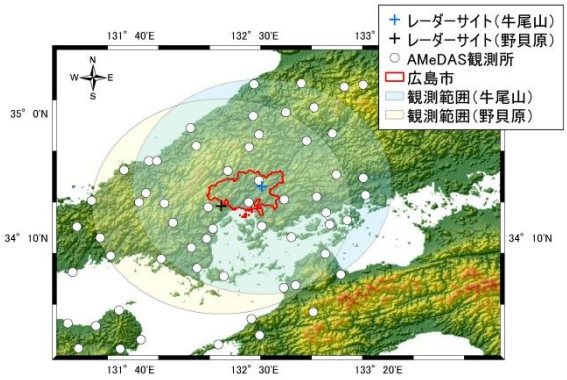


図-3 レーダーサイトおよびAMeDAS観測所

(2) 同化手法（3次元変分法）

本研究では3次元変分法を同化手法として選択した．その理由として，4次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタと比較して解析値の算出に対する計算負荷が小さく，より迅速に予測が可能である点が挙げられる[7]．3次元変分法では次式に示す評価関数を最小とするように解析値を算出する．

$$J(x) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}^b)^T\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}-\mathbf{x}^b) + \frac{1}{2}(H(\mathbf{x})-\mathbf{y}^o)^T\mathbf{R}^{-1}(H(\mathbf{x})-\mathbf{y}^o) \quad (1)$$

ここに，$\mathbf{x}$：解析値，$\mathbf{x}^b$：第一推定値，$\mathbf{B}$： 背景誤差共分散行列，H：観測演算子，$\mathbf{y}^o$：観測値，$\mathbf{R}$：観測誤差共分散行列である．本研究ではレーダーデータのうち動径風と反射強度のデータを使用した．

(3) 計算条件

本研究では，ネスティングによる2つの計算領域を設定した（**図-1**）．**表-1**に示すように，内側の計算格子に関しては，既往の研究[8]より線状降水帯が補足しうる解像度である1 kmに設定した．予測期間に関しては，最も降雨が強かった時間帯を対象として，2014年8月20日0時から2014年8月20日9時に設定した．また，0時での予測計算に必要な初期値に関しては，同化サイクルによって作成した．同化サイクルとは，同化と同化結果を初期値とした予報を繰り返すことを意味する．本研究では，**図-2**に示すようにサイクル期間を19日23時から20日0時の1時間に設定した．さらに，同化サイクルの間隔を10分，30分，1時間と変化させることにより観測データの時間的な密度の影響を確認した．なお，同化処理は内側領域

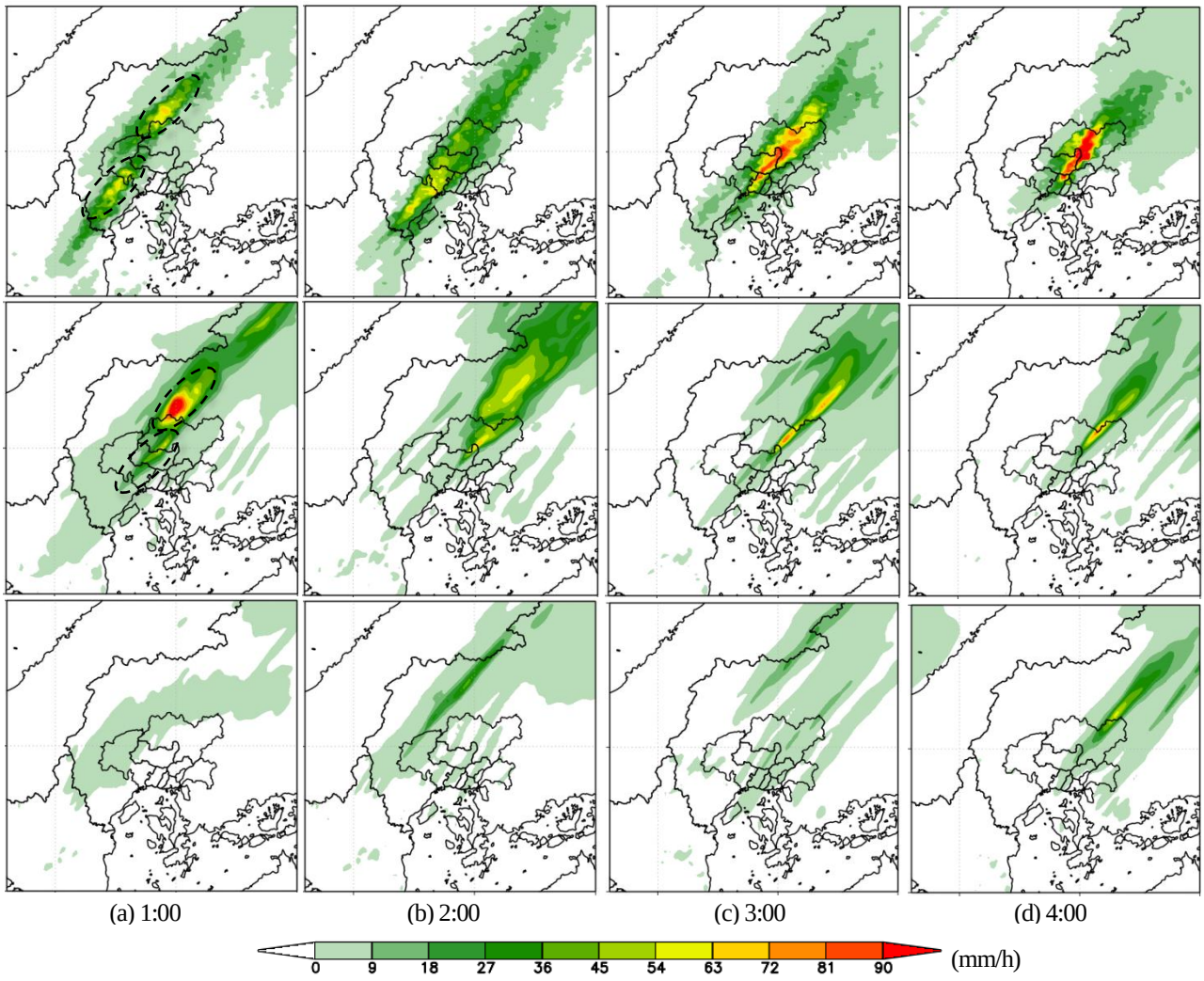


図-4　1時間雨量分布（2014/8/20 1:00 – 2014/8/20 4:00，上：解析雨量，中：同化あり（10 min），下；同化なし）

のみで行っている．これは，本研究では，2 way-nestingを行うことで効率的に外領域へも同化の効果を波及させることが出来ると考えたからである．予測計算に使用した境界値は，予測という観点から，側方には気象庁のMSMの予報値，下部（地表面気温および土壌水分量）には米国海洋大気庁のGFS予報値を与えた．また，下部の初期値には国立環境予測センターのRTG-SSTデータも使用したが，今回のような短期間の予測では海面水温の日変動の影響はないと考え，固定とした．

同化の条件設定に関しては，式(1)中の**B**をNMC法[9]により算出した．なお，制御変数は*u*, *v*, *T*（気温），*Ps*（地表面気圧），*RHs*（疑似相対湿度）としており，対流性降雨に対する同化に適しているとされているもの[10]を選定した．

また，使用観測データに関して，本研究では広島市を東西に挟み込む形で設置されている2つのレーダーサイト（野貝原，牛尾山）のデータを使用した（**図-3**）．X-band MPレーダーは異なる仰角で観測を実施しており，5分間で12仰角の観測を行う．本研究では空間的に広い観測値を得るために，同化時間の前5分間を集計して同化

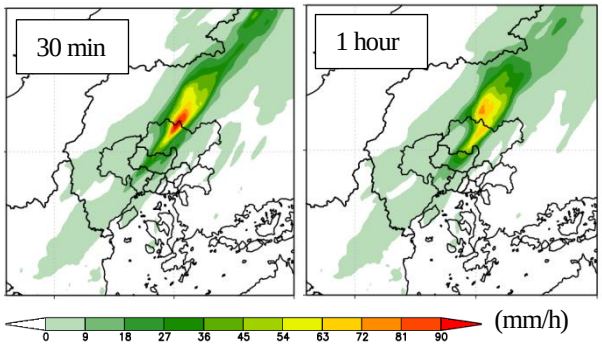
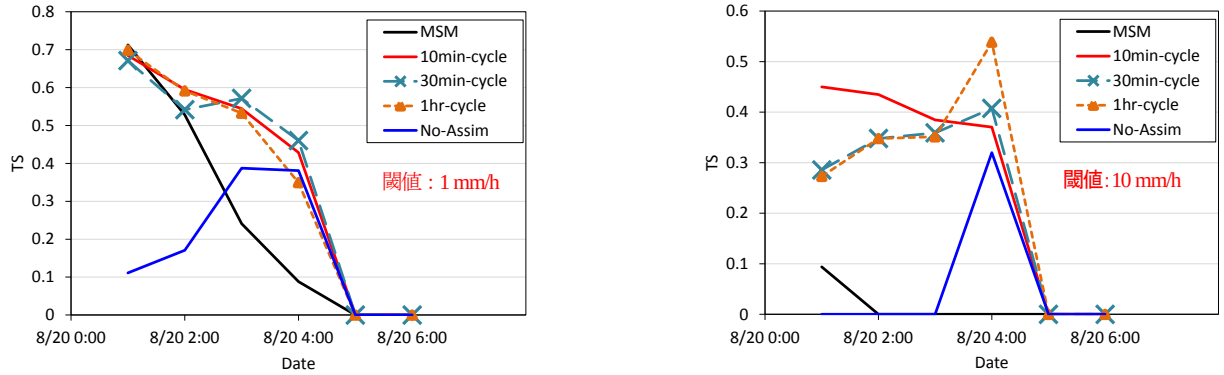


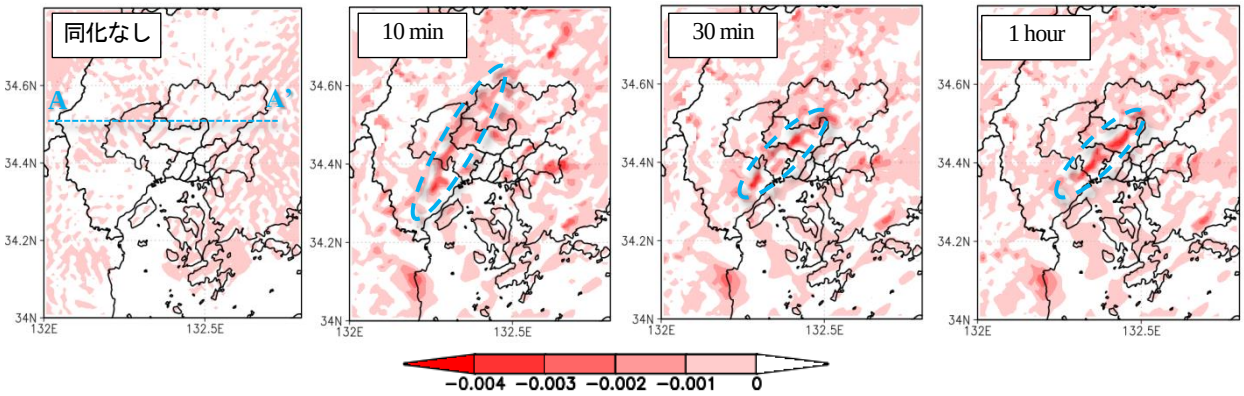
図-5　2014/8/20 1:00における1時間雨量分布
（左：同化あり（30 min），右；同化あり（1 hour））

している．なお，計算格子への内挿処理として，本研究では計算格子点内でのクレスマン内挿による空間平均化処理を施した．さらに，地表面の観測データとして内側領域内にある59箇所のAMeDAS観測所の気温，風速，気圧，相対湿度を用いた．

3. 計算結果



図−6　スレットスコアによる比較（左：閾値 1 mm/h，右：閾値 10 mm/h）



図−7　初期値（2014/8/20 0:00）における 900 hPa 面の収束分布

(1) １時間雨量分布による評価

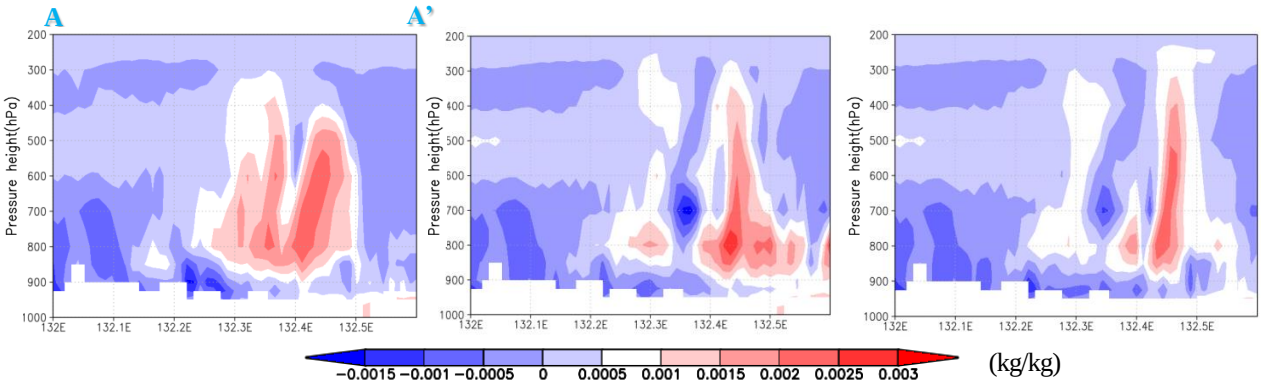
図−4に2014年8月20日1時から2014年8月20日4時までの1時間雨量分布を示す．解析雨量（図−4上段）において，1時で2つの線状降水帯が確認される．その後，降水帯は東に移動し，3時および4時において，勢力を増しながら停滞した結果，広島市北部を中心に強雨をもたらしている．次に，同化サイクルを10分にして同化を行った場合の予測結果を図−4中段に示す．図より，1時において過大評価ではあるものの線状降水帯が予測できていることが確認できる．さらに，発生位置が異なるものの観測で見られたような2つの線状降水帯が見られた．その後，2時において降水帯は東方向に移動する様子が見られた．3時および4時においては，レーダー観測と比較して，強雨域の位置や範囲に差異が見られるが降水帯が停滞・維持する様子が確認できた．一方で，同化なしの場合（図−4下段）に関して，1時では観測と同化ありで見られたような線状降水帯の発生は見られなかった．さらに，2時において弱い降水帯の発生が見られるが，その位置は北西方向に大きくずれていることが分かる．その後，4時において広島市北部において線状降水帯が見られるが，その位置は北東方向にずれており，またその雨量は同化ありの場合と比較して小さい．

さらに，図−5に同化サイクルの時間間隔を変化させたケースの予測結果（2014年8月20日1時）を示す．図より，他の2ケースについても，10分間隔の場合（図−4中段）と同様に線状降水帯の発生が確認できる．しかしながら，その位置は東方向にずれている．それに加えて，10分間隔やレーダー観測の場合で見られたような2つの線状降水帯の発生は予測出来ていないことが確認できる．

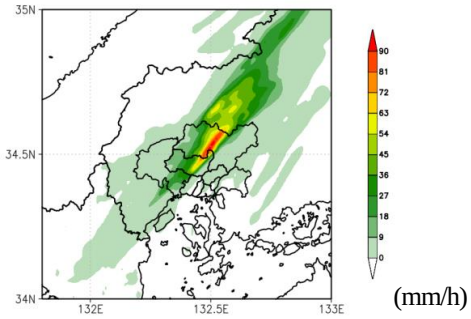
(2) スレットスコアによる比較

定量的に予測精度を評価するため，本研究ではスレットスコアによる比較を行った．ベンチマークとして使用するMSMの解像度（5 km）で空間平均をとり評価を行った．図−6に1時間雨量に対するスレットスコアの経時変化を示す．まず，弱雨（閾値：1 mm/h）に関しては，予測初期（1時から2時）において，MSMと同化した場合の予測結果では高いスコアを示している．一方で，同化なしの場合は約0.1と低いスコアを示している．その後，MSMのスコアは低下し，同化した場合は比較的高い値を示している．次に，強雨（閾値：10 mm/h）に関して比較を行う．10分間隔の場合では，1時において他のケースより高いスコアを示している．これは，前節での傾向とよく対応しており，10分間隔の場合では，降水帯の発生位置を比較的良好に予測できていることによるものである．また，MSMに関しては全ての時間を通して，低いスコアを示していることから，ほとんど強雨を予測できていないことが分かる．

以上のことから，XRAINデータを同化することで降



図−8　初期値（2014/8/20 0:00）における同化ありと同化なしの水蒸気混合比の差分分布（A-A’断面）



図−9　2014/8/20 1:00 における 1 時間雨量分布（下層 2 仰角使用）

雨の予測精度は向上することが分かった．さらに，より短い間隔での同化サイクルで予測した場合，その精度はさらに向上することが分かった．また，弱雨と強雨両方において，4時付近で同化した場合のスコアが同化しない場合のスコアに近づく傾向が見られる．このことから，同化の効果が約4時間程度であることが推定できる．

(3) データ同化が初期値場に与える影響

本節では，同化の効果と同化サイクルの時間間隔が物理に及ぼす影響を議論する．図−7に，同化サイクル直後の初期時刻（2014/8/20 0時）における900 hPa面での風速ベクトルの発散（式(2)で定義）を示す．

$$div = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \qquad (2)$$

ここに，u：東西成分の風速，v：南北成分の風速である．なお，図では負の値，つまり，風速場の収束のみを示している．図より，同化なしの場合では，全体的に収束が弱く算出されている．このことから，収束による対流活動が小さくなり，図−4に示すように弱い降水にとどまったと考えられる．一方で，同化ありの場合では，すべてのケースにおいて図中の青い丸破線で示すように強い収束域が確認できる．このことから，XRAINの動径風を同化したことによって，風の収束場が形成されたことが分かる．また，同化ありのそれぞれのケースを比較すると，収束域の位置に違いが見られた．30分間隔と1時間間隔のケースと比較して，10分間隔のケースでは収束域が北東方向に移動していることが分かる．これらの収束域の違いが図−4および図−5で見られたような降水帯の位置に影響を及ぼしたことが示唆される．

次に，図−7に示すA-A’線における水蒸気混合比の分布を図−8に示す．ここでは，同化ありの場合と同化なしの場合の差分，つまり，XRAINの反射強度を同化したことによる修正量を示している．図より，30分間隔と1時間間隔のケースで高混合比の範囲が東方向に集中している．一方で，10分間隔のケースでは，他の2ケースと比較して西側に移動していることが分かる．

以上のことから，XRAINデータの同化が対流性降雨の発達し易い環境場を表現できることを確認した．また，短い同化サイクルで初期値を作成することで，より確からしい大気場を推定することが可能であることを示した．

(4) 観測仰角の違いが予測雨量分布に与える影響

本節では，使用する観測仰角の違いが予測結果に与える影響について議論する．複数仰角での観測（ボリュームスキャン）は，X-band MP レーダーの特徴の一つと言え，より効果的な予測手法を検討する上で重要な事項である．前節までは12仰角のデータ使用していたのに対して，本節では下層2仰角のデータのみを使用した場合について比較を行う．なお，同化サイクルの間隔は10分とした．図−9に下層2仰角を使用した予測結果（2014年8月20日1時）を示す．図より，このケースについても線状降水帯が確認できる．しかしながら，図−4および図−5と比較して，その位置は南東方向に移動している様子が確認できた．加えて，図−4の同時刻で確認できたような2つの線状降水帯は確認できなかった．このことから，使用する観測仰角を減らすことで雨量分布の予測精度は低下することが示唆される．

観測仰角数の変化の影響を見るために高度別での初期場（2014年8月20日0時）の雨水混合比分布の比較を行う．図−10に12仰角を使用した場合，図−11に下層2仰角を使用した場合の高度別（900 hPa面，700 hPa面）雨水混合比分布を示す．図−10より，12仰角のデータを使用した場合では，広島市北西部において両高度で雨水の存在が確認できる．これは，700 hPa面でも適切にレーダーの

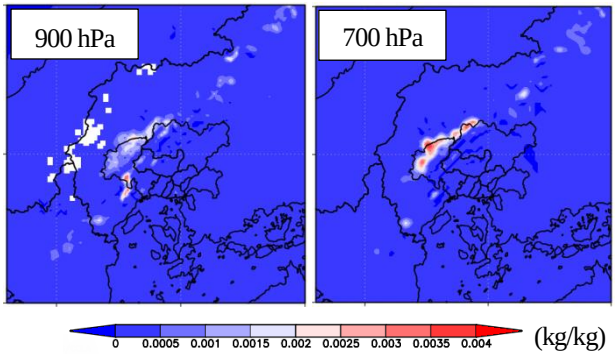


図-10　12 仰角を使用した場合の雨水混合比分布
（左：900 hPa 面，右：700 hPa 面）

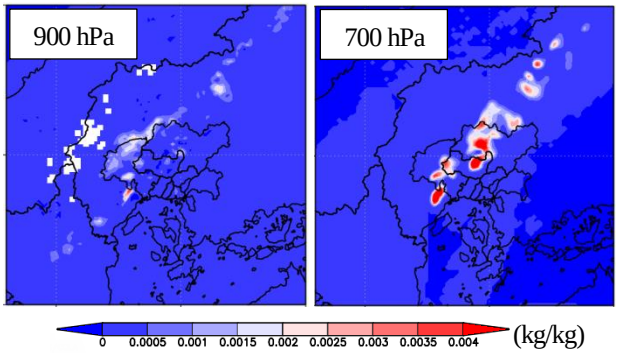


図-11　下層 2 仰角を使用した場合の雨水混合比分布
（左：900 hPa 面，右：700 hPa 面）

反射強度が同化出来ていることを意味している．一方で，下層2仰角のデータを使用した場合（**図-11**）では，900 hPa面では**図-10**と同様に広島市北西部で雨水が見られる．しかし，700 hPa面では広島市の中心を横切るような雨水分布が見られた．これは，同化サイクル期間で生成された雨雲が下層では修正されるものの上層では修正されなかったことが理由として考えられる．この修正されなかった上層の雨雲が広島市中心部で雨をもたらし，降水帯の発生位置に影響を及ぼしたことが示唆される．

以上より，積乱雲のような高い高度まで雨雲が発達する場合には，高高度にまで同化による効果を与える必要がある．そして，そのためにはXRAINのような高仰角で観測を行うデータが重要であることが明らかになった．

4. 結論

本研究では，XRAINデータを活用した数値予測システムの確立を目的として，2014年広島豪雨に対してXRAINデータを同化した数値モデルの予測精度の評価を行った．以下に得られた知見を列挙する．

1) XRAIN データを同化することで，同化なしの場合では見られなかった線状降水帯の発生と維持を予測が可能となる．
2) 同化サイクルを短くすることで，より適切な収束場と水蒸気場が形成され，発生位置が的確に予測可能となる．
3) 低仰角のみを使用した場合，上層の雨水混合比分布の修正がされず，降水帯の発生位置が移動した．

謝辞：本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費（課題番号：16J04027）および公益財団法人中国電力技術研究財団による助成を受けた．また，九州大学情報基盤研究開発センター所有の計算機により本数値解析を実施した．さらに，X-band MP レーダーデータを国土交通省中国地方整備局，MSMデータを京都大学生存圏データベースから提供頂いた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

1) 木川誠一郎：高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予報技術について，測候時報，第81巻，pp.55-76, 2014.
2) 中北英一：集中豪雨のモニタリングと予測，ながれ，第29巻，pp. 203-210, 2010.
3) 中北英一，西脇隆太，山邊洋之，山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 69，I_325-I_330, 2013.
4) Xiao, Q., Y. Kuo, J. Sun, W. Lee, E. Lim, Y. Guo, and D. M. Barker: Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 44, pp.768-788, 2005.
5) 中野俊夫，鈴木靖，増田有俊：大阪都市部における強雨予測手法の開発，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 70, I_499-I_504, 2014.
6) 北真人，河原能久, Nyunt, C. T.：XRAINデータを同化したWRFによる2014年広島豪雨の数値予測，土木学会論文集B1（水工学）, Vol. 73, I_205-I_210, 2017.
7) 関山剛：大気微量成分のデータ同化～観測とモデルの融合～, http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ap/ap-1lab/member/tsekiyam/files/data_assimilaltion2010.pdf
8) 北真人，河原能久，椿涼太, Nyunt, C. T.：WRFによる2014年8月広島豪雨の数値解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 72, I_211-I_216, 2016.
9) Parrish,F., C. Derbber: The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system, Monthly Weather Review, Vol.120, pp. 1747-1763, 1992.
10) Xie Y., C. Lu, and G.L. Browning：Impact of formulation of cost function and constrains on three-dimentional vari-ational data assimilation, Monthly Weather Review, Vol. 130, pp. 2433-2447, 2002.

（2017. 4. 3受付）