

XRAIN データを活用した前線性降雨における 線状降水帯の予測精度向上

横江 祐輝^{1)†} 北 真人²⁾ 内田 龍彦³⁾ 河原 能久⁴⁾

1) 兵庫県土木部砂防課

(〒650-8567 兵庫県神戸市中央区下山手通5丁目10-1)

(現 (株) 東京建設コンサルタント関西本社 (〒530-0042 大阪府大阪市北区天満橋1-8-63 トーケン大阪ビル))

2) (一財) 河川情報センター 河川情報研究所

(〒102-8474 東京都千代田区麹町1-3)

(現 岐阜工業高等専門学校環境都市工学科 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2))

3) 広島大学大学院先進理工系科学研究科社会基盤環境工学プログラム

(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

4) 広島大学防災・減災研究センター

(〒739-8511 広島県東広島市鏡山1-3-2)

†連絡先著者 (Corresponding Author) E-mail: yyokoe0202@gmail.com

2018年6月28日から7月8日にかけて西日本を中心に記録的な豪雨が発生した。梅雨前線による広域で長期的な豪雨に加えて局所的に線状降水帯が形成され、多くの河川において長期にわたる高い水位や洪水氾濫が発生した。災害軽減のためには大雨を早期に予測することが重要となっているものの、とりわけ、線状降水帯の発生位置や発生時刻を精度良く予測することは難しいと言われている。本研究では、WRFを用いた数値予測において、広島県と岡山県のXバンドMPレーダを3時間同化することにより、3時間以上前から線状降水帯の発展を予測することに成功した。また、再現計算結果より、大気下層の収束と上空の鉛直シアが継続していたことが線状降水帯の停滞の要因であることを示した。

キーワード：線状降水帯, WRFモデル, データ同化, XRAIN

I. 序論

近年、集中豪雨の増加による浸水被害や土砂災害が多発している。その中で最近では「線状降水帯」と呼ばれる線状の降水域が大雨に大きく寄与していることが確認されている。特に平成30年7月豪雨では西日本を中心に複数の線状降水帯が発生し、甚大な被害が引き起こされた。これらの豪雨災害に対する防災対策にはハード対策とソフト対策の2つがあり、これらによる災害のリスク軽減は国民の安全・安心のためには不可欠となっている。ハード対策には洪水に対して堤防やダム、土砂災害に対して砂防や擁壁の整備が含まれる。しかし、ハード対策には多くの費用と長い年月が必要であり、たとえ費用を投じて整備しても計画を超える現象には耐えること

ができず、人命を守るためには、避難、鉄道・道路などの適切な運休・規制、ダムの最適運用など、情報に基づくソフト・ハードの一体的な対策が求められている。このためには、高密度な気象観測データを用いることで数時間先の降雨をより正確に予測することが基本情報として極めて重要である。

今回対象とする平成30年7月豪雨はShimpo *et al.* (2019) が示しているように熱帯起源の2つの非常に湿った気流が西日本に流れ込み、梅雨前線に沿った大規模な上昇流により記録的な大雨がもたらされたものである。本豪雨に対する研究として、小坂田・中北 (2019) は現在及び将来気候に関する大規模アンサンブル実験データd4PDFにより、今回の豪雨の発生頻度や規模に対する地球温暖化による影響を評

価しており、発生頻度は将来増加しないものの、強度が増すことを示している。また、本豪雨における数値予測に関する研究として Matsunobu and Matsueda (2019) は ECMWF, JMA, NCEP によるアンサンブル予測の評価を行っているが、7月6日から7日の豪雨時はほかの時刻と比較して、予測可能性が低かったことを示している。Kotsuki *et al.* (2019) は全球非静力学大気モデルに局所アンサンブル変換カルマンフィルタを適用した NICAM-LETKF による数値実験を行っており、ラジオゾンデのデータ同化の有用性を示している。しかしながら、これらの数値解析は総観スケールの現象を対象としているために格子解像度が粗く、個々の積乱雲や線状降水帯といったメソスケールの現象については不明な部分が多いのが現状である。

線状降水帯は数時間に局地的な大雨をもたらすものの、その発生位置や時刻を正確に予測することは非常に困難である。気象庁では数時間先の降雨現象を予測するために局地モデル (LFM) を用いて計算を行っている。LFM は水平解像度が 2 km であり、水平規模が 10 km 程度の積乱雲などの小さいスケールの現象を表現することを目的としている (本田ら, 2018)。本豪雨に対して、7月6日19時における LFM の15時からの子報値と XRAIN による解析値の比較を図-1に示す。19時において XRAIN による観測値では線状降水帯の発生を捉えているものの、LFM の子報値は線状降水帯の発生位置や形状を精度良く予測することができておらず、予測精度向上が喫緊の課題であると考えられる。線状降水帯の予測に対する研究として、北ら (2016) は平成26年8月広島豪雨に

対してダウンスケーリングを用いることで線状降水帯の再現を試みており、線状の降水帯は現れたものの降水帯の位置や停滞現象については不十分な点が多い。その原因として、中北 (2010) は降雨予測には大気モデルに入力する初期情報の精度が重要であり、きめ細かな観測情報の取り込みの必要性を指摘している。初期情報の精度向上方法の一つとして変分法によるデータ同化が挙げられ、この中にも三次元変分法と四次元変分法の2種類の方法がある。三次元変分法は正規分布を仮定した観測値と第一推定値の積の項である評価関数を最小とする値を求めることで、尤もらしい解析値を求める手法である。しかしながら、三次元変分法では解析時刻のみで評価関数を算出するため、誤差の時間発展を考慮できず大気の時間変化による影響を評価することができない。一方で、四次元変分法は同化ウィンドウを設定し、その時間内で数値モデルにより前方積分することで観測値が存在する時刻の観測値との誤差を算出し、アジョイントモデルにより後方積分を行うことによって、その誤差を同化ウィンドウの初期の時刻の誤差として評価し修正することを繰り返すことで解析値を求める手法となっている (淡路ら, 2009)。四次元変分法では観測時刻や大気の時空間変化も考慮した手法であることから、三次元変分法と比較して、豪雨予測精度が高いことが知られている (例えば, Mazzarella *et al.*, 2017)。しかしながら、四次元変分法は計算コストが大きいため、高頻度な予測と速報性の高いデータ配信に対しては不向きであることより、現況の気象庁 LFM では三次元変分法が用いられているのが現状である (気象庁予報部, 2020)。変

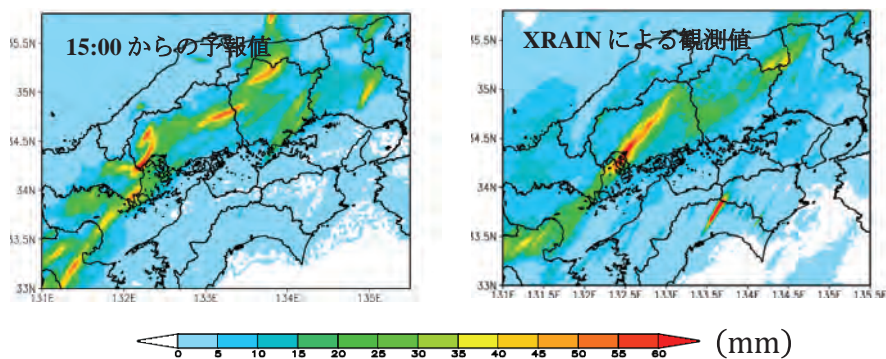


図-1 2018年7月6日19時の1時間雨量のLFM予測値と観測値の比較。
(左: LFMの15時からの子報値, 右: XRAINによる観測値)

Fig. 1 Comparison of 1-hr rainfall at 19:00 on July 6, 2018 between LFM forecast and observation by XRAIN. (Left, forecast value of LFM from 15:00 on July 6, 2018; Right, observation value of XRAIN).

分法以外にはカルマンフィルターによる手法がある(淡路ら, 2009)。アンサンブルカルマンフィルターでは複数のアンサンブルメンバーを発生させることで正規分布とは限らない確率分布を近似的に表現できる手法である。しかしながら、異なる誤差量を与えた多数のメンバーから誤差共分散行列を確率的に求めるため、計算負荷が膨大になるため、迅速に計算・配信するのには不向きである。そこで本研究では相対的に小さな計算負荷で解析値を算出できる三次元変分法を活用したサイクル同化に着目する。この手法は、モデルによる前方積分と三次元変分法によるデータ同化を交互に行うことで観測値の時刻の違いを考慮することが可能となっており、バックビルディング型の線状降水帯の予測に対して有効であることが知られている(例えば, Lagasio *et al.*, 2019)。

一方、国土交通省はXバンドMPレーダネットワーク(XRAIN)の整備を進めており、5分間で12仰角を運用することで降雨の三次元情報を観測している。横江ら(2019)は平成30年7月豪雨において広島県で発生した線状降水帯について、XRAINを用いて降水システムの三次元構造の特徴を詳細に捉えることが可能であることを示しており、XRAINデータがデータ同化に有用であると考え、XRAINデータの数値予報への活用に関する研究として、中野ら(2014)は兵庫県上空で発生した線状降水帯においてXRAINデータを同化することにより予測精度が向上する可能性を示しているものの、その取扱い方法については不明な部分が多いのが現状である。山口ら(2017)は2012年7月に京都で発生した線状降水帯に対してXRAIN同化による予測可能性を検証し、初期の積乱雲群を同化することにより1時間先まで予測精度が向上した。また、北(2018)は2014年8月に広島で発生した線状降水帯発生要因であるバックビルディング現象について、数十分先まで予測できることを示した。このようにXRAINデータの数値予報への有用性がいくつか報告されているものの適用事例は少なく、平成30年7月豪雨のように、広域の降雨の中に線状降水帯が埋め込まれているような現象についての有用性について明らかにされていない。

そこで本研究では平成30年7月豪雨に発生した線状降水帯に対し、XRAINで得られた情報の同化することによる予測精度を評価するとともに、物理場の影響を調べる。具体的には、データ同化しない単独なネスティング実験と比較することで、データ同化による予測精度向上を定量的に評価するとともに、

物理環境場の変化を分析する。加えて、予測開始時刻を変化させることで、線状降水帯の予測リードタイムを検証する。また、豪雨期間中常に同化することで高精度な再現結果を取得し、得られた結果の物理場を解析することで、線状降水帯のメカニズムを解明する。

II. 対象豪雨

本研究で対象とした平成30年7月豪雨は2018年6月28日から7月8日にかけて発生した前線性の降雨である。図-2に広島地点(AMeDAS)のハイエトグラフを示す。これより、7月5日の朝から降雨が降り始め、それが長期的に継続していたことが分かる。また、7月6日の夕方と7日の明け方に2度の降雨のピークが発生しており、非常に激しい降雨が発生していた。横江ら(2019)は、降雨のピーク時には線状降水帯が形成されており、特に降雨が激しい7月6日の夕方には、その線状降水帯は積乱雲の進行方向と逆側で新しい積乱雲が発生・発達するバックビルディング型であったことを報告している。本研究では河川水位の急激な上昇をもたらした一つ目の降雨のピークに着目する。

III. 計算手法

本研究ではNCAR(National Center for Atmospheric Research)が中心となって開発している領域気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting)を使用した。WRFでは基礎方程式には静力学平衡の近似が施されていないため、格子幅を狭く設定することができる。基礎方程式系は、3方向の運動方程式、温位保存式、質量保存式、ジオポテンシャルの時間変

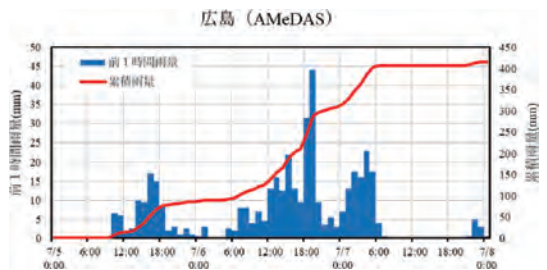


図-2 広島AMeDASにおける7月5日0時から7日24時までの3日間のハイエトグラフと累積雨量

Fig. 2 Hyetograph and accumulated rainfall at Hiroshima AMeDAS station from 0:00 July 5 to 24:00 July 7.

化の式，相対比湿保存式，気体の状態方程式からなる (William *et al.*, 2019)．本研究では，Version 4.0 を使用した．

同化手法は計算負荷の低減を目的として三次元変分法を採用した．これは最尤推定法に基づいたデータ同化手法となっており，次に示す評価関数の最小値を求めることで尤もらしい解析値 x を得ることができる．

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

ここに， x ：解析値， x^b ：第一推定値， B ：背景誤差共分散行列， H ：観測演算子， y^o ：観測値， R ：観測誤差共分散行列である．

背景誤差共分散行列は次の式で表現される．

$$B = \langle \varepsilon^b (\varepsilon^b)^T \rangle \quad (2)$$

ここに， ε^b ：真値と第一推定値の誤差であり，期待値を $\langle \rangle$ で表現している．しかしながら真値を求めることは不可能であるため，本研究ではNMC法 (Parrish *et al.* 1992) を用いて背景誤差共分散行列を推定する．これは初期値の時刻が異なる2つの予報の差を取ることで背景誤差共分散行列の推定を行う手法である．本研究では，6月21日から7月20日までの一ヶ月間について，1日2回12時間予報値と6時間予報値の差の結果を用いて推定した．ここで一ヶ月としたのは，2018年7月5日から7日の降雨の代表となる背景誤差共分散行列を得るためであり，同様に線状降水帯を対象とした事例である北 (2018) が行った手法を参考に設定した．また，1日2回としたのは昼と夜の差が現れないようにするためである．

観測誤差共分散行列は次の式で表現される．

$$R = \langle \varepsilon^o (\varepsilon^o)^T \rangle \quad (3)$$

ここで， ε^o ：真値と観測値の誤差を表す．しかしな

がら，真値や観測誤差の共分散を求めることは不可能であるため，対角成分は計算格子内の複数の観測値の分散を観測誤差の分散として，対角成分以外は観測値同士に相関がないと仮定し0と簡略化することで観測誤差共分散行列を算出した．

IV. 計算条件

図-3に計算領域を示す．本研究では計算負荷の軽減とダウンスケーリングを目的として，2重ネストによる計算領域を設定した．計算条件を表-1に示す．外領域d01では格子解像度を5 kmとし，これは初期条件及び境界条件に使用している気象庁MSM解析値の解像度を考慮したものである．ただし，気圧面のデータは配信データの関係上，水平解像度約10 kmに間引かれたデータを利用している．また，内領域d02では格子解像度を1 kmとした．両領域間のデータのやり取りはtwo-way nestingを採用しており，内領域d02の境界条件は外領域d01によって与えられ，d02の平均値をd01の対応する値に上書きすることによって2方向のやり取りを行っている．初期条件及び境界条件に用いたデータセットは前述した

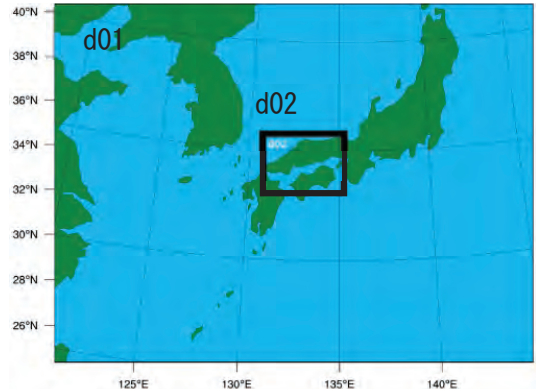


図-3 WRFにおける計算領域
Fig. 3 Model domains of WRF.

表-1 計算条件

Table 1 Calculated conditions of WRF

	外領域 (d01)	内領域 (d02)	データ	使用物理量
格子数	480 × 360 × 60	480 × 360 × 60	MSM	海面更正気圧，地上気圧，
格子解像度	5 km	1 km	(地上物理量)	風速 (東西，南北)，気温，相对湿度
時間間隔	10秒	2秒	MSM	高度，風速 (東西，南北)，気温
雲微物理スキーム	WSM6(WRF Single-Moment 6-class scheme)		RTG-SST	海面水温度
境界層乱流	YSU(Yonsei University scheme)		FNL	土壌水分量，土壌温度
地表面モデル	Noah Land Surface Model			
初期値及び境界値	MSM (気象庁メソ数値予報モデル GPV) Real-time, global, sea surface temperature analysis NCEP FNL Operational Global analysis data			

MSM解析値の他に、海水面温度のデータとしてRTG-SST (Real Time Global Sea Surface Temperature) を使用し、土壌温度や土壌水分量のデータとしてNCEP FNLデータを使用した。

大気境界層スキームと雲微物理スキームは局地豪雨の再現において特に重要となっている。本研究では、これらのスキームで感度実験を行い、適切な物理モデルを選択した。本研究では、雲微物理スキームに関してはWSM6 (Hong *et al.*, 2014), Thompson (Thompson *et al.*, 2008), Lin (Chen *et al.*, 2002) の比較を行い、境界層スキームとしてはYSU (Hong *et al.*, 2006), MYJ (Janjic, 1994), ACM2PBL (Pleim, 2007) の比較を行った。図-4に2018年7月6日18時以降における太田川流域内の広島地点と沼田川流域内の本郷地点についてAMeDASの観測値とWRFの計算値の比較を示す。なお、境界層スキームにはYSUを用いた。雲微物理モデルの比較より、広島地点では7月6日19時からの降雨に対して、どのスキームでも強い降雨を再現していたが、本郷地点では7月6日20時の激しい降雨に対して再現精度は悪く、雲微物理モデルの違いで再現性の向上は見られなかった。また、どちらの地点も総雨量は解析値が観測値を上回る結果であるものの、WSM6が最も近

い値を示していた。図-5は雲微物理モデルにWSM6を用いた場合による境界層スキームの比較である。これより、境界層スキームの比較でも、雲微物理スキームと同様にモデルごとに総雨量は異なるものの、中でもYSUが他のスキームと比較して総雨量が観測値に近い値を示していた。このことより、本研究では雲微物理スキームにはWSM6を、境界層スキームにはYSUを使用する。

本研究ではデータ同化にXバンドMPレーダによって観測されたレーダ反射因子とドップラー速度のデータを使用した。レーダ反射因子では以下の評価関数を用いて雨水混合比の修正を行う。

$$J_{qr} = \frac{1}{2} \sum (q_r - q_r^{ob})^2 / \sigma_{qr} \quad (4)$$

ここで、 q_r : モデルから得られる雨水混合比 (kg/kg), q_r^{ob} : 観測値における雨水混合比 (kg/kg), σ_{qr} : 観測値における雨水混合比の分散である。

Juanzhen and Andrew (1997) より、レーダ反射因子と雨水混合比との関係を示す観測演算子は以下のように表現される。

$$Z = 43.1 + 17.5 \log_{10} \rho q_r \quad (5)$$

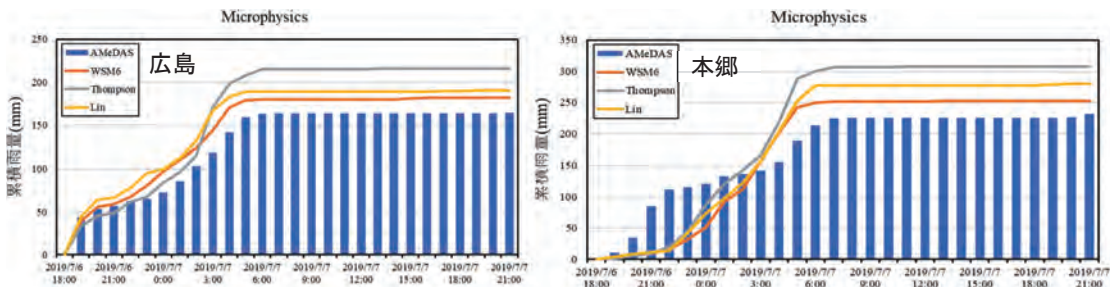


図-4 雲物理モデルの違いによる累積雨量の比較。(左: 広島地点, 右: 本郷地点)

Fig. 4 Accumulated rainfall by microphysics. (Left, Hiroshima Station; Right, Hongou Station)

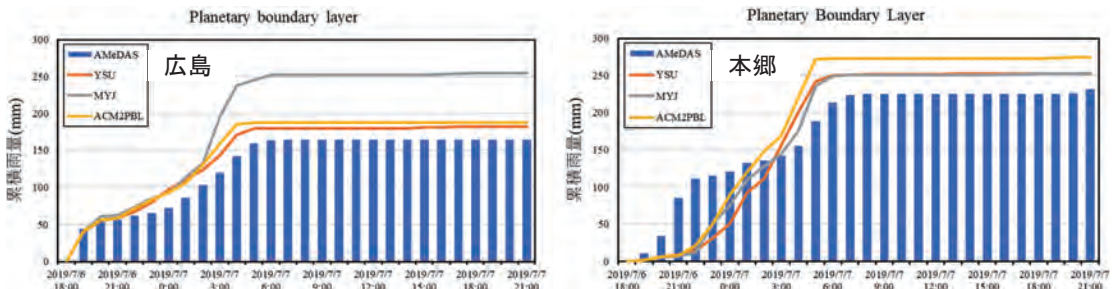


図-5 境界層モデルの違いによる累積雨量の比較。(左: 広島地点, 右: 本郷地点)

Fig. 5 Accumulated rainfall by planetary boundary layer. (Left, Hiroshima Station; Right, Hongou Station)

ここで、 Z : レーダ反射因子, ρ : 空気の密度 (kg/m^3), q_r : 雨水混合比 (kg/kg) である. また, 雪と霰の混合比について, 背景場の気温に応じて Gao and Stensrud (2012) で提案された観測演算子を用いて同化を行った.

ドップラー速度では以下の評価関数を用いて動径風の修正を行う.

$$J_{vr} = \frac{1}{2} \sum (V_r - V_r^{ob})^2 / \sigma_{vr} \quad (6)$$

ここで、 V_r : モデルから得られる動径風 (m/s), V_r^{ob} : 観測から得られる動径風 (m/s), σ_{vr} : 観測値における動径風の分散である.

本研究では、XバンドMPレーダの観測値の空間解像度はWRFの計算格子に対して高くなっているため、計算格子内に含まれているデータを用いて観測値の代表値と観測値の分散を算出する. 具体的には、計算格子内のデータに対して格子点の中心を基準とした距離の重み付け平均をすることにより格子内の代表値を算出し観測値として、格子内のデータの値のばらつきから分散を算出し観測誤差共分散行列の対角成分としてデータ同化に用いた. しかしながら、本研究では観測値の分散を観測誤差の分散とする大きな仮定を置いており、Desroziers *et al.* (2005) の innovation statistics などを用いて観測誤差を求めることなども今後の重要な課題である.

図-6にデータ同化に使用したXバンドMPレーダの位置関係を示す. XバンドMPレーダは広島県の牛尾山と野貝原, 岡山県の熊山と常山の4つを使用した. 複数のレーダの観測範囲に含まれている場合は、Xieo *et al.* (2007) らが行った方法と同様に、それぞれの観測値から評価関数を算出し、それらが最小となる値を求めることで修正を行った.



図-6 XバンドMPレーダの位置関係
Fig. 6 Positional relation of X-band MP radars.

V. データ同化による初期値改善効果の検証

1. XバンドMPレーダを活用した計算結果の評価

本節ではXバンドMPレーダの観測値が同化結果に与える影響についての検討を行う. 本研究ではデータ同化と予測を繰り返す「解析サイクル」を採用した. 具体的には第一推定値に対して3次元変分法でレーダデータの同化を行うことで解析値を算出し、その解析値を初期値とし10分間の予測を行う. その後、得られた予測値を第一推定値として再度3次元変分法を行う、といったサイクルを同化期間内で10分毎に繰り返して計算を行った. 同化期間は2018年7月6日12時~15時とし、10分間隔でXバンドMPレーダの観測値のデータ同化を行い、予測計算の初期値を作成した. ここで、同化期間が3時間である理由として、WRFの初期条件に使用している気象庁MSM解析値のデータが3時間間隔であり、時間内挿して作成する初期条件では予測精度が著しく低下すること、XバンドMPレーダの観測値をより広範囲に反映させることを考慮したためである. 一方で同化なしのケースでは15時でのMSM解析値を初期値として計算を行った. ここで、同化なしで15時を初期値とした理由として、データ同化は初期情報の精度向上を目的としており、本研究では15時における初期値をより高精度にすることを狙っているためである. 2-way nestingを採用していることから、同化する計算領域はd02のみとする.

図-7に同化ありと同化なしにおけるRMSEの時間変化を示す. RMSE (Root Mean Squared Error) は以下の式を用いて算出した.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2} \quad (7)$$

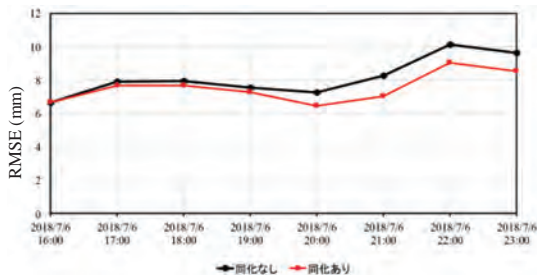


図-7 同化ありと同化なしの1時間雨量におけるRMSEの時間変化

Fig. 7 Time variation of root mean squared error (RMSE) of 1 hr rainfall of assimilation and non-assimilation.

ここに、 F_i : WRFによる降水量の計算値 (mm/h), O_i : 観測値 (mm/h) = XRAINにより観測された降水量を表している。また、RMSEは内領域d02における全ての格子点を対象にし、計算格子点に最も近いXRAINデータとの比較を行った。これより、同化ありでは全体的にRMSEの減少が見られ、データ同化により予測精度の向上が見られた。また、線状降水帯が形成されていた20時以降からRMSEに差がみられた。

次に、線状降水帯が形成されていた時刻における1時間雨量の平面分布の比較を図-8に示す。これより、同化なしでは19時において広島県南西部に線状に降雨域が形成される様子が確認でき、これはXRAINによる観測値での特徴と一致する。しかしながら、20時において2つの積乱雲群が分離する様子が現れ、線状降水帯の停滞を予測することができていない。一方、同化ありでは19時に見られた線状降水帯は20時でも維持・停滞している様子が確認でき、線状降水帯を精度よく再現できている様子が確認できる。

続いて、データ同化が物理場に及ぼす影響を考察する。図-9にd02領域の大气下層(850hPa)における相当温位と風速分布を示す。これより、同化なしでは19時において南西方向から346 K以上である暖かく湿った空気が広島湾周辺に流れ込む様子が確認できる。しかしながら、20時において北西方向から冷たく乾燥した空気が侵入することで、暖かく

湿った空気が広島湾周辺に流れ込むことができず、線状降水帯が維持できなかった。それに対して、同化ありでは19時において暖かく湿った空気が南西方向から流れ込む様子と、それが20時になっても継続している様子が確認できる。結果としてデータ同化により広島湾上空では10 K程度の差が現れており、降水が発生しやすい気象場が形成されていた。

次に、大气下層(900 hPa)における大气の収束発散分布と風速分布を図-10に示す。ここでは密度

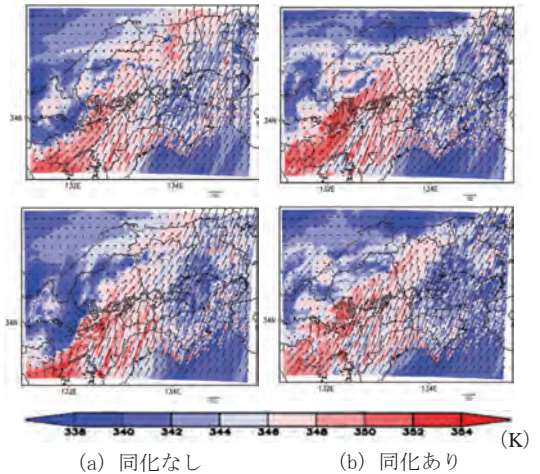


図-9 相当温位と風速分布の時間変化。(上: 7月6日19時, 下: 20時)

Fig. 9 Time variation of equivalent potential temperature and wind. (Upper, 19:00 on July 7; Lower, 20:00 on July 7).

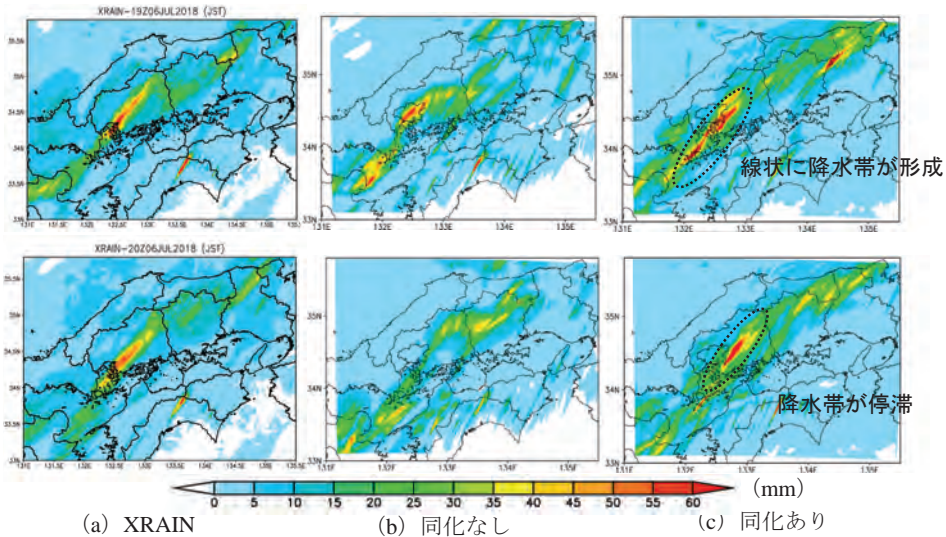


図-8 1時間雨量の時間変化。(上: 7月6日19時, 下: 20時)

Fig. 8 Time variation of 1 hr rainfall. (Upper, 19:00 on July 7; Lower, 20:00 on July 7)

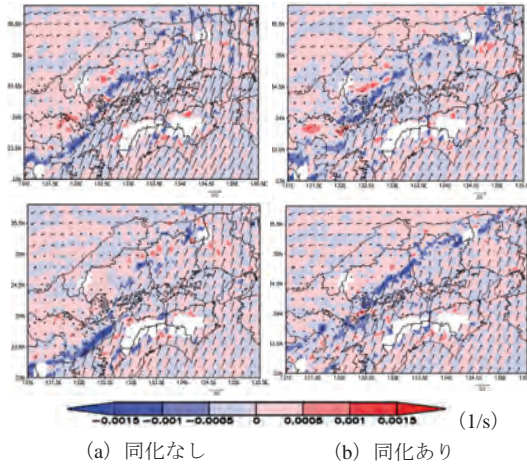


図-10 収束発散分布の時間変化. (上：7月6日19時, 下：20時)

Fig. 10 Time variation of distributions of convergence and divergence. (Upper, 19:00 on July 7; Lower, 20:00 on July 7).

を加えた質量保存式ではなく、上昇流を引き起こす原因であり、降雨に強く関係することが知られている水平フラックス収束(二宮, 2014)に着目する。収束発散分布は以下の式で計算した。

$$div = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

ここに、 u ：東西方向の風速成分 (m/s)、 v ：南北方向の風速成分 (m/s) を表す。式から分かるように、 div が正の値は風速場の発散を表し、負の値は収束を表している。図-10より、同化なしでは19時において-0.001 (1/s) 以下の収束域が広島湾周辺に発生し、上昇流が発生している様子が確認できるものの、20時では広島湾上空で収束域が発生していない。一方で同化ありでは20時においても広島湾周辺に-0.001 (1/s) 以下の収束域が発生している様子が確認でき、データ同化により対流が発生しやすい気象場が形成されていた。

過去に広島で線状降水帯が発生した平成26年8月豪雨では、北(2018)による研究でも数時間後の線状降水帯を予測できていなかったものの、本事例では線状降水帯を予測できた要因として、本事例は広域の中に線状降水帯が埋め込まれている豪雨であったことが考えられる。XバンドMPレーダはその性質から、データを取得できるのは雨雲がある場所に限られるが、本事例のような広域に雨が降っている事例では、広域でレーダデータを同化が可能である。

その中でも物理場に大きく関係する風速場について、広域に観測値を反映できたことが本事例において線状降水帯の予測精度向上に大きな影響を及ぼしたと考えており、より詳細に検討する必要がある。

2. 予測開始時刻の違いによる予測精度の検証

本節ではデータ同化を用いた予測における予測開始時刻の違いによる予測精度の評価を行う。前節の同化条件に加えて、同化サイクルを前3時間ずらして比較を行う。また、データ同化における気象場の修正の限界値の目安を示すために、12時からの同化サイクルを21時まで継続して計算を行ったものを表す。

図-11にRMSEの時間変化を示す。これより、同化あり(9~12時)は同化なしと比較して全体的に高いRMSEの値を示しており、予測精度が悪いことが確認できる。特に線状降水帯が発生していた19時において誤差が大きくなっていた。この時刻の降雨強度の平面分布を図-12に示す。これより、XRAINによる観測では広島県南西部に線状降水帯が形成されていたものの、同化あり(9~12時)では線状降水帯の形成位置が再現できていなかったことでRMSEの

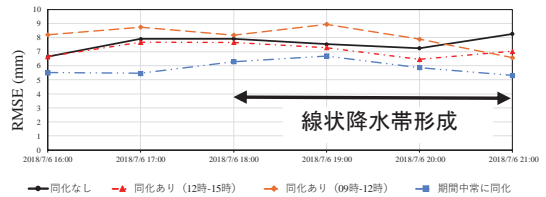


図-11 RMSEの時間変化
Fig. 11 Time variation of RMSE.

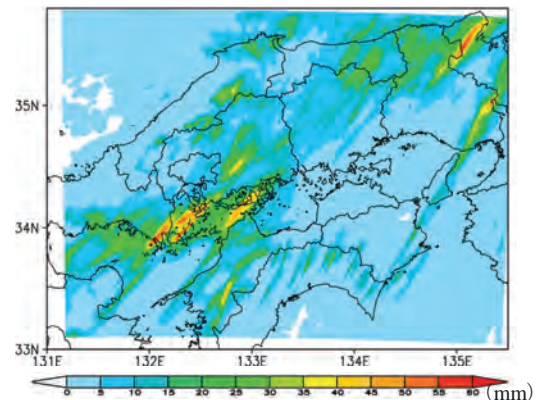


図-12 19時における1時間降水量の平面分布. (同化あり09-12)

Fig. 12 Horizontal distribution of 1 hr rainfall at 19:00 on July 6. (Assimilation 09-12)

値が増加していた。このことから、本豪雨において、今回設定した三次元変分法でのデータ同化手法を用いて線状降水帯が予測できるのは4, 5時間前程度が限界であることが分かる。

VI. 線状降水帯の形成メカニズム

再現計算により得られた結果を用いて線状降水帯のメカニズムの検討を行う。本章では可能な限り正確な再現計算である、7月6日12時から21時まで常に同化した計算結果を使用する。

図-13に7月6日19時における10分間降水量と上空の鉛直シアの結果を示す。黒のベクトルは900 hPa面の、白のベクトルは700 hPa面における風速ベクトルを表す。これより、同化した再現計算結果では豊後水道から広島湾にかけて時計回りの鉛直シアがみられ、暖気移流の場であることが確認できる。また、線状降水帯の先端付近では鉛直方向に大きな鉛直シアがみられ、これは2014年の広島豪雨のバックビルディング型での線状降水帯の鉛直シアの特徴(北ら, 2016)と一致する。また、同様の鉛直シアを数時間確認した。一方で、線状降水帯の停滞が確認できなかった同化なしの結果では、18時40分において広島湾上空で時計回りの鉛直シアがみられる

ものの、それが継続していなかった。このことから、本豪雨時は鉛直シアが長時間にわたって継続しており、線状降水帯が形成されやすい気象場が形成されていたと考えられる。

図-14に線状降水帯が形成されていた18時40分から19時40分における水蒸気フラックスの分布を示す。ここで、水蒸気フラックスは下記により算出した。

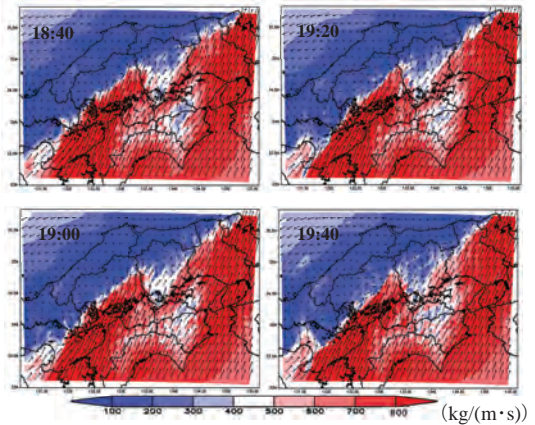


図-14 水蒸気フラックスの時間変化。矢印は水蒸気フラックスのベクトルを表す

Fig. 14 Time variation of water vapor flux. Arrows mean the vector of water vapor flux.

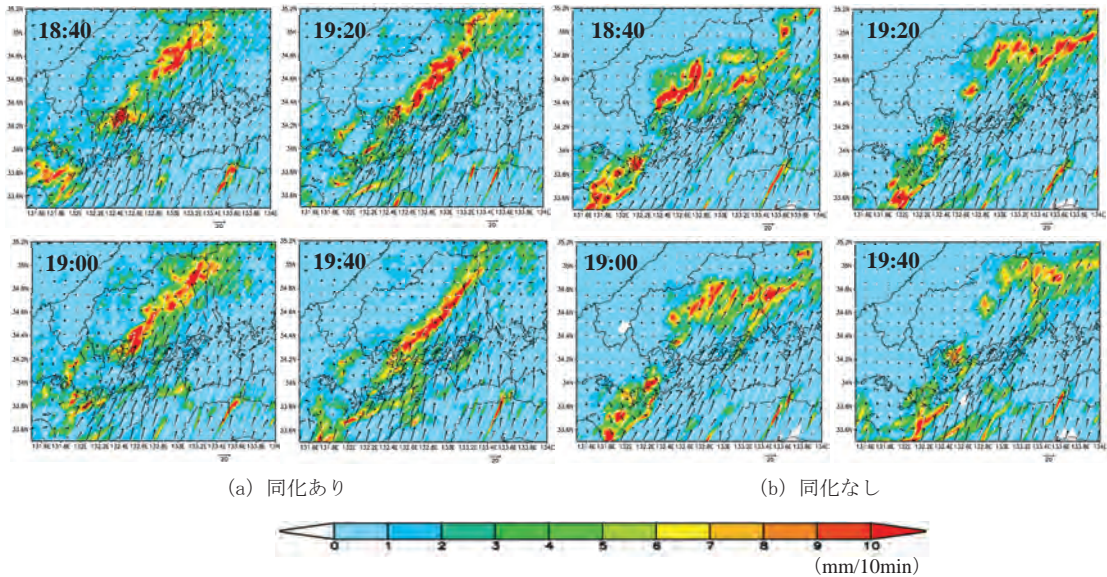


図-13 7月6日18時40分から19時40分までの10分間降水量と上空の鉛直シア。(黒の矢印は900 hPa面、白の矢印は700 hPa面の風速分布を表す)

Fig. 13 10min-precipitation and vertical shear from 18:40 to 19:40 on July 6th. (Black arrows mean wind vectors at 900 hPa, white arrows mean wind vectors at 700 hPa)

$$\bar{q}_{flux} = \frac{1}{g} \int_{700}^{1000} q_v \bar{v} dp \quad (9)$$

ここに、 \bar{q}_{flux} ：水蒸気フラックス ($g/(m^2 \cdot s)$)、 q_v ：水蒸気混合比 (kg/kg)、 g ：重力加速度 (m/s^2)、 \bar{v} ：風速ベクトル (m/s) である。

これより、18時40分から19時40分において、高い水蒸気フラックスが豊後水道を通り広島県に供給され続ける状況であったことが分かる。また、水蒸気フラックスの変化の大きい場所が時間とともに東側に推移していく様子を確認することができる。これにより、線状降水帯の位置が時間の経過とともに東側に移動したと考える。図-15に大気下層である900 hPa面における収束発散分布を示す。19時において広島湾上空で強い収束域が発生していた。これは18時40分ごろに発生しており、それが19時20分ごろまで継続していた。大気下層の強い収束は線状降水帯の停滞に大きく寄与することから、広島湾上空の大気の収束により線状降水帯が同じ場所に停滞した。その後、広島湾上空の大気の収束が弱くなり、この時刻から線状降水帯は停滞せずに西側に推移した。

VII. 結論

本研究では、平成30年7月豪雨を対象にして、XRAINを用いたデータ同化手法を検討した。さらに再現計算を基に線状降水帯のメカニズムの解明を行った。以下に本研究で得られた知見を述べる。

本豪雨においてXRAINを用いたデータ同化では、

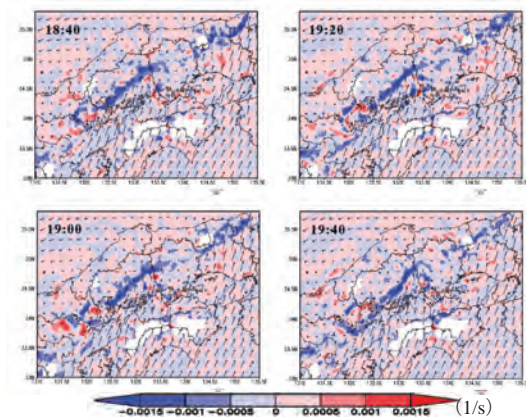


図-15 収束発散分布の時間変化。矢印は風速ベクトルを表す

Fig. 15 Time variation of convergence-divergence distributions. Arrows mean wind vector.

広島県と岡山県の4台を3時間の同化サイクルにより計算することで、特に7月6日20時における線状降水帯の停滞が予測でき、XRAINの有用性を示した。しかしながら、データ同化において線状降水帯は4時間程度前から予測が可能であるものの、7時間前以降では線状降水帯の形成位置が予測できなかった。

また、再現計算結果では、線状降水帯が形成・停滞していた時刻では、バックビルディングが発生しやすい鉛直シアが継続していたこと、多量の水蒸気が南西方向から流れ込んだこと、下層大気の収束が維持されていたことが相まって長時間線状降水帯が維持されていた。

本研究では検討した豪雨が1事例に限定されているため、今後、広域の降雨の中に線状降水帯が埋め込まれているような他の豪雨に対して検討し、手法の汎用性を明らかにすることが必要である。その後、本研究のデータ同化手法を狭い雨域の線状降水帯に適用することで、現象の違いによる線状降水帯の予測可能性を評価する予定である。また、レーダのどのデータが予測精度向上に有用なのか検証するために、同化条件を変化させることでの予測精度の違いを検討する。

謝辞

利用したXRAINデータセットは文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム (DIAS) により収集・提供されたものである。MSMデータは京都大学生存圏データベースから提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 淡路敏之・蒲地政文・池田元美・石川洋一 2009. データ同化—観測・実験とモデルを融合するイノベーション. 京都大学学術出版社; 284.
- Chen SH, WY Sun. 2002. A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 89: 99-118. DOI: 10.2151/jmsj.80.99.
- Desroziers G, Berre L, Chapnik B, and Poli P. 2005. Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131: 3385-3396. DOI:10.1256/qj.05.108.
- Gao J, DJ Stensrud. 2012. Assimilation of Reflectivity Data in a Convective-scale, Cycled 3DVER Framework with Hydrometeor Classification. *Journal of the Atmospheric Sciences* 69: 1054-1065. DOI: 10.1175/JAS-D-11-0162.1.
- 本田有機・坂本雅巳・藤田 匡・室井ちあし 2018. 第4章数値予報モデル. 平成30年度数値予報研修テキスト52:90-105.

- Hong SY, J Dudhia, SH Chen. 2014. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42: 129-151.
- Hong YS, Y Noh, J Dudhia. 2006. A new Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review* 134: 2318-2341. DOI: 10.1175/MWR3199.1.
- Janjic ZI. 1994. The step-Mountain Eta coordinate Model: Future developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review* 122: 927-945. DOI: 10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSM ECM>2.0.CO;2.
- Juanzhen S, CN Andrew. 1997. Dynamical and Microphysical Retrieval from Doppler Radar Observations Using a Cloud Model and Its Adjoint. Part I: Model Development and Simulated Data Experiments. *Journal of the Atmospheric sciences* 54: 1642-1661. DOI: 10.1175/1520-0469(1997)054<1642:DAMRFD>2.0.CO;2.
- 北 真人 2018. XRAINデータを活用した集中豪雨の精度向上. 広島大学大学院工学研究科博士論文: 101.
- 北 真人・河原能久・椿 涼太・Cho Thanda Nyunt 2016. 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) 72(4): 211-216. DOI: 10.2208/jscejhe.72.1_211.
- 気象庁予報部 2020. メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告66: 165.
- Kotsuki S, Terasaki K, Kanemaru K, Satoh M, Kubota T, Miyoshi T. 2019. Predictability of Record-Breaking Rainfall in Japan in July 2018: Ensemble Forecast Experiments with the Near-Real-Time Global Atmospheric Data Assimilation System NEXRA. *SOLA 15A*: 1-7. DOI: 10.2151/sola.15A-001.
- Lagasio M, Silvestro F, Campo L, Parodi A. 2019. Predictability of a High-Resolution Hydrometeorological Forecasting Framework Coupling WRF Cycling 3DVAR and Continuum. *Journal of Hydrometeorology* 20: 1307-1337. DOI: 10.1175/JHM-D-18-0219.1.
- Matsunobu T, Matsueda M. 2019. Assessing the Predictability of Heavy Rainfall Events in Japan in Early July 2018 on Medium-Range Timescales. *SOLA 15A*: 19-24. DOI: 10.2151/sola.15A-004.
- Mazzarella V, Maiello I, Capozzi V, Budillon G, Ferretti R. 2017. Comparison between 3D-Var and 4D-Var data assimilation methods for the simulation of a heavy rainfall case in central Italy. *Advances in Science and Research* 14: 271-278. DOI: 10.5194/asr-14-271-2017.
- 中北英一 2010. 集中豪雨のモニタリングと予測. *ながれ* 29: 203-210.
- 中野俊夫・鈴木 靖・増田有俊 2014. 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) 70(4): 499-504. DOI: 10.2208/jscejhe.70.1_499.
- 二宮洗三 2014. 地球の降雨. *天気* 61, 29-34.
- 小坂田ゆかり・中北英一 2019. 平成30年7月豪雨の特徴および地球温暖化による影響評価. 土木学会論文集B1 (水工学) 75(1): 231-238. DOI: 10.2208/jscejhe.75.1_231.
- Parrish FD, D C John. 1992. The National Meteorological Center's Spectral Statistical-Interpolation Analysis System. *Monthly Weather Review* 120(8): 1747-1763. DOI: 10.1175/1520-0493(1992)120<1747:TNMCSS>2.0.CO;2.
- Pleim JE. 2007. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 44: 1383-1395. DOI: 10.1175/JAM2539.1.
- Shimpo A, Takemura K, Wakamatsu S, Togawa H, Mochizuki Y, Takekawa M, Tanaka S, Yamashita K, Maeda S, Kurora R, Murai H, Kitabatake N, Tsuguti H, Mukougawa H, Iwasaki T, Kawamura R, Kimoto M, Takayabu I, Takayabu Y, Tanimoto Y, Hirooka T, Masumoto Y, Watanabe M, Tsuboki K, Nakamura H. 2019. Primary Factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the Subsequent Heat Wave in Japan. *SOLA 15A*: 13-18. DOI: 10.2151/sola.15A-003.
- Thompson G, PR Field, RM Rasmussen, DW Hall. 2008. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review* 136: 5095-5115. DOI: 10.1175/2008MWR2387.1.
- Xiao Q, J Sun. 2007. Multiple radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP 2002. *Monthly Weather Review* 135: 3381-3404. DOI: 10.1175/MWR3471.1.
- 山口弘誠・古田康平・中北英一 2017. 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の予測. 土木学会論文集B1 (水工学) 73(4): 211-216. DOI: 10.2208/jscejhe.73.1_211.
- 横江祐輝・北 真人・内田龍彦・河原能久 2019. XRAINからみた平成30年7月豪雨時における広島県内の降水システムの特徴. 土木学会論文集B1 (水工学) 75(1): 270-278. DOI: 10.2208/jscejhe.75.1_270.
- William CS, Joseph BK, Jimy D, David OG, Zgiquan L, Wei W, Jordan B, Michael GD, Dale MB, Xiang-Yu H. 2019. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *NCAR Technical Note*: 145. DOI: 10.5065/1dfh-6p977.

(受付: 2021年11月11日, 受理: 2022年3月30日)
この論文への討議・コメントを, 2023年1月末日まで受け付けます。

Predictability Improvement of Band-shaped Precipitation Systems in the Frontal Rainfall Using XRAIN Data

Yuki YOKOE ^{1)†} Masato KITA ²⁾ Tatsuhiko UCHIDA ³⁾ Yoshihisa KAWAHARA ⁴⁾

¹⁾ Hyogo Prefectural Government Erosion Control Division

(5-10-1 shimoyamate St., Kobe City, Hyogo 650-8567, Japan)

(Present: TOKEN C.E.E. Consultants Co.,Ltd (1-8-63 Tenmabashi, Kita-ku, Osaka City, Osaka 530-0042, Japan))

²⁾ Foundation of River & Basin Integrated Communications

(1-3 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8474, Japan)

(Present: Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gifu College

(2236-2 Kamimakuwa, Motosu City, Gifu 501-0461, Japan))

³⁾ Civil and Environmental Engineering Program, Graduate School of Advanced Science
and Engineering, Hiroshima University

(1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima City, Hiroshima 739-8527, Japan)

⁴⁾ Resilience Research Center, Hiroshima University

(1-3-2 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima City, Hiroshima 739-8511, Japan)

†Corresponding Author E-mail : yyokoe0202@gmail.com

During June 28 to July 8, 2018, heavy rainfall occurred mainly in the western part of Japan. In addition to widespread long-term heavy rain caused by the Baiu front, band-shaped precipitation systems locally developed, causing flooding and sediment disasters. Predicting the band-shaped precipitation systems for disaster mitigation is necessary, but the prediction of their location and time of occurrence accurately has been recognized as a persistent challenge.

For this study, we conducted numerical predictions using Weather Research and Forecasting (WRF) model. We have shown that WRF with a 1 km grid system and assimilation of the X-band Multi-Parameter (MP) radars in Hiroshima and Okayama prefectures for 3 hr can capture band-shaped precipitation systems more than 3 hr in advance. Furthermore, we have demonstrated that wind convergence in the lower atmosphere and the continuation of vertical shear in the wind velocity caused stagnation of the line-shaped precipitation systems.

Key words : band-shaped precipitation system, data assimilation, WRF model, XRAIN