

2013年島根県西部豪雨を対象としたWRFによる ダウンスケール実験

DYNAMIC DOWNSCALE EXPERIMENT ON HEAVY RAINFALL IN WESTERN SHIMANE PREFECTURE IN 2013 USING WRF

北 真人¹・河原能久²・椿 涼太³・Cho Thanda NYUNT⁴
Masato KITA, Yoshihisa KAWAHARA, Ryota TSUBAKI 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境工学専攻 (同上)

³正会員 工(博) 広島大学大学院助教 工学研究科社会基盤境工学専攻 (同上)

⁴正会員 工(博) 広島大学大学院特任助教 工学研究科社会基盤境工学専攻 (同上)

Downscaling can provide meteorological variables of high-resolution or at local scales from those of lower-resolution. This study aims to clarify the effects of dynamic downscaling on heavy rainfall in the western Shimane prefecture in 2013 using WRF (Weather Research and Forecasting) model. Comparison between the innermost domain results using three nested grids and radar-AMeDAS data shows that the calculated moving pattern of rainfall reasonably corresponds to that by radar observation, while single grid and two nested grids fail to reproduce the heavy rainfall. Downscaling with three nested grids explains that high moisture was transported from high-pressure systems over the Pacific Ocean and the Japan Sea, which converged over Shimane Prefecture to cause the heavy rainfall. Discussion on catchment averaged precipitation demonstrates that Yato river of small catchment area is sensitive to the difference in the location of rainband.

Key Words : WRF (Weather Research and Forecasting), dynamic downscaling,
heavy rainfall, moisture transport, area average rainfall

1. 序論

近年, 地球温暖化による世界規模での気候変動が問題とされており, それに起因する集中豪雨が増加する傾向にある. 限られた地域において短時間に多量の降雨が発生した場合, 流域では外水・内水氾濫, 土砂災害が発生することが懸念される. そのため, 豪雨災害の軽減対策を講じることがますます重要となっている. そのソフト対策の一つとして, 早期雨量予測のような気象・災害情報の高度化とその雨量情報の活用が挙げられる. 流域スケールの雨量情報を早期に入手することで, 洪水調節や水防活動をより有用なものとする考えられる.

水文・気象学の分野では, 水文気象データを大きなスケールの既知のデータから小さいスケールのデータを算出する手続きを一般的にダウンスケーリングと呼ぶ. ダウンスケーリングには統計的ダウンスケーリングと力学

的ダウンスケーリングがある. 前者は, GCM (Global Climate Model) のような解像度の低い全球モデルと地上観測の過去の結果より, 予め求めておいた両者間の統計的な関係に基づいて小さいスケールの気象特性を算出するものである¹⁾. 一方で, 力学的ダウンスケーリングでは, GCMや他の気象モデルのデータを初期値, 境界値として解像度の高い領域型気象モデルを時間積分することで空間的に細分化を行う²⁾. 力学的ダウンスケーリングでは, 全ての物理量を互いに整合的な状態で算出することから, 集中豪雨の再現および予測に適している.

著者ら³⁾は, 本研究でも使用するWRF (Weather Research and Forecasting) と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter) を用いて, 2013年島根県西部豪雨を対象として, 西日本を計算領域に設定した状態で再現を試みた. その結果, 降雨期間前半において, 降雨の発生位置や移動パターンの再現が出来なかった. その対応として, 総観規

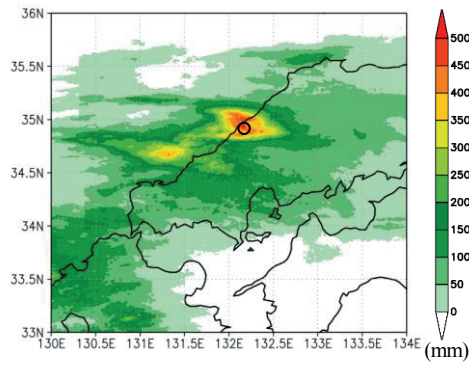


図-1 解析雨量による期間累積雨量
(2013年8月23日12時～8月25日12時)

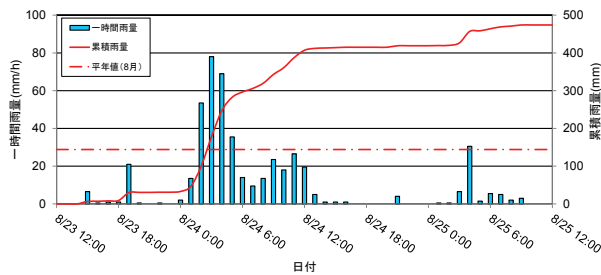


図-2 アメダス雨量計による位置時間雨量と累積雨量
(2013年8月23日12時～2013年8月25日12時, 桜江地点)

模での大気現象をさらに考慮することが必要であることを示唆した。この解決策として、計算範囲が広く解像度が低い計算結果に力学的ダウンスケーリングを施し、計算領域が狭く解像度が高い計算を行う手法（ネスティング）を採ることで、総観規模での現象を考慮することが可能であると考え。そこで、本研究では、データ同化をしない状態で、島根県西部豪雨に関するダウンスケーリング実験を実施し、その有効性について検討する。竹見⁴⁾のように、ネスティングを使用し、局地的豪雨の再現に成功した事例はあるが、そのネスティングの影響を議論した事例は少ない。そのため、本研究ではネスティングが集中豪雨の予測精度に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 対象豪雨の概要

本研究では2013年8月23日から25日にかけて発生した島根県西部豪雨を対象とする。なお、対象期間中に停滞前線が島根県付近に接近しており、対象豪雨は前線性の降雨である。図-1に降雨期間（2013年8月23日12時～8月25日12時）における解析雨量の累積雨量分布を示す。図より、島根県西部において350 mmを超える降雨が見られる。また、山口県北東部（萩市須佐町付近）においても約280 mmの降雨が見られる。

時間雨量に着目すると、アメダス観測地点の桜江（図-1中の黒丸）では、図-2に示すように、24日3時におい

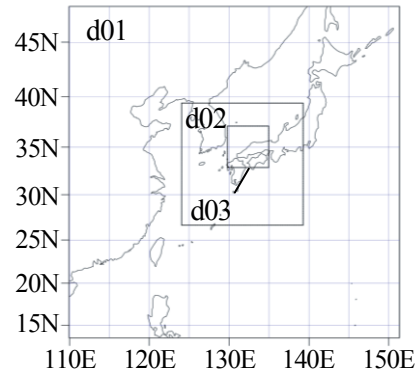


図-3 計算領域

表-1 計算条件

	d01	d02	d03
格子数(WE×SN×V)	145×145×32	160×160×32	160×160×32
格子間隔(km)	27	9	3
タイムステップ(sec)	90	30	10
surface model	Noah Land Surface		
planetary boundary scheme	MYNN Level2.5		
cumulus parameterization	Kani-Fritsch		No Use
microphysics	WSM3		

表-2 計算ケース

	対象領域	計算開始時間
3-nest	d01,d02,d03	2013/8/22 15:00(d01)
		2013/8/23 15:00(d02)
		2013/8/23 15:00(d03)
2-nest	d02,d03	2013/8/22 15:00(d02)
		2013/8/23 15:00(d03)
1-nest	d03	2013/8/22 15:00(d03)

て時間雨量78 mmを記録（観測史上1位）し、それ以降も断続的に強い降雨が発生している。さらに、累積雨量は約500 mmを記録している。この値は、同地点における8月の平年値である144.1 mmの約3倍となっており、多量の降雨が短期間に発生したことが分かる。

3. 数値計算の概要

(1) 気象モデル（WRF）の概要

本研究では気象モデルWRFを使用した。これは、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することによる。

(2) 計算条件

図-3に計算領域、表-1に計算条件を示す。本研究では、力学的ダウンスケーリング（ネスティング）により、広範囲から狭い領域までの計算を実施するため、3つの計算領域を設定した。総観規模（1,000~10,000 km）での現象を捉えるために日本全域を囲む第一領域（d01）、西日本を囲む第二領域（d02）、中国地方および四国地方を囲む第三領域（d03）で構成されている。これらの計

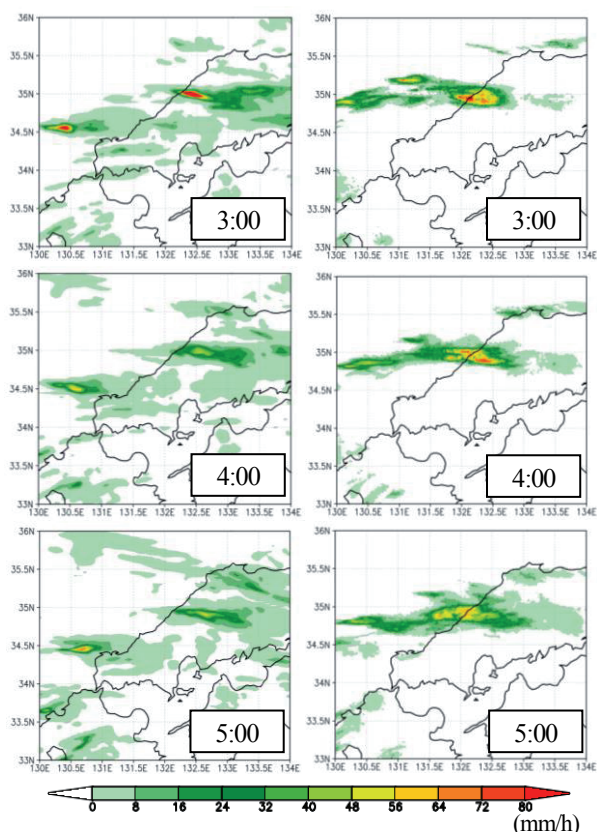


図-4 2013年8月24日3時から5時における一時間雨量分布
(左；計算値 (3-nest) ，右；解析雨量)

算領域の数を、表-2に示すケースのように変化させることで大気現象の捕捉範囲が計算精度に与える影響を検討する。すなわち、ネスト数を減少させることによって、解析領域を狭くし、総観規模での大気現象を考慮しにくくなる状況を設定した。なお、本研究では、外側の計算領域から内側の領域へ一方向に計算結果を反映させる1-wayネスティングを採用した。また、第一および第二領域においては、格子間隔が広く積雲対流を陽に計算出来ないため、積雲パラメタリゼーションを使用した。積分開始時間に関しては、表-2に示すように最も外側の領域において、1日間の助走期間を設けてネスティングを行った。

使用データに関して、最も外側の領域の初期値・境界値として、NCEPが発行しているGFS4 (Global Forecast System version 4) の解析値を使用した。モデル地形の作成には、米国地質調査所 (USGS) が発行する30秒間隔の地形データ (GTOPO30) および土地利用データ (24-category USGS landuse) を利用した。

4. 計算結果

(1) 雨量分布に対する精度検証

図-4に、降雨期間の前半であり、強い降雨が観測され

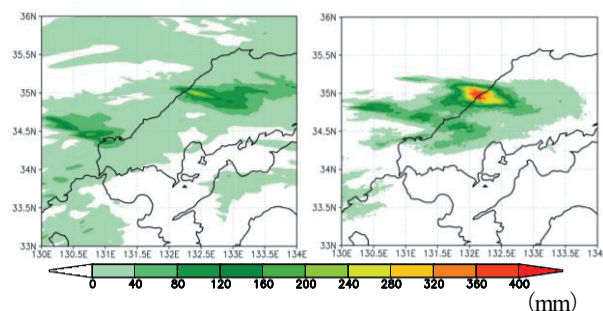


図-5 2013年8月24日0時から12時における累積雨量分布
(左；計算値 (3-nest) ，右；解析雨量)

た2013年8月24日3時から8月24日5時にかけての一時間雨量分布を示す。図より、解析雨量 (図の右半分) では、島根県西部において強い降雨域が観測されている。この傾向はこの期間以降もしばらく継続して観測されている。一方で、最も計算範囲を広くとり、総観規模での大気現象を捕捉した3重ネストでの計算値 (図の左半分) では、3:00において解析雨量と同様に、島根県西部において強い線状の降水帯が再現されている。そして、両者において約80 mm/hとなっており、量においても再現されている。しかしながら、その位置は僅かに北東方向にずれている。次に、4時において、解析雨量では降水帯はその勢力を維持した状態で、島根県西部に留まっている。計算値では、一時間前と同様に北東方向にずれている。また、雨量も一時間前と比べると大幅に低下しており、計算値の降水帯では観測と同様な傾向が見られなかった。この理由としては、解析雨量では島根県西部の強雨域より西の一直線上に降水域が見られ、この雨雲が西部の雨雲と合体したことから、勢力が保たれていたことが考えられる。一方で、計算値では、一直線上に強雨が見られず、山口県の下関直上に別の強雨域が見られた。このため、計算値では時間経過と共に勢力が低下したと考えられる。しかしながら、島根県西部にとどまるという点では一致が見られた。また、5時においても、量が過小評価になる傾向と位置がずれるという点が見られたが、島根県西部に留まる傾向が見られた。

図-5に、2013年8月24日0時から12時にかけての12時間の累積雨量分布を示す。図より、両者において一時間雨量 (図-4) と同様に島根県西部で強い降雨が発生している。しかし、解析雨量では約400 mmを示しているのに対し、WRFの計算結果では最大で約280 mmと過小に評価している。また、一時間雨量の結果と同様に、強雨域の位置も北東方向にずれる傾向が見られる。さらに、強雨域の範囲も解析雨量よりも狭くなっている。

以上のことから、3重ネストを用いたWRFは、集中豪雨の位置や雨量に差が見られるものの、島根県西部に強い降雨が発生したことや降雨域の移動パターンを概ね算出できることが分かった。今後、更なる高解像度化や、降雨の発達に最も関与するとされる雲微物理モデルや接

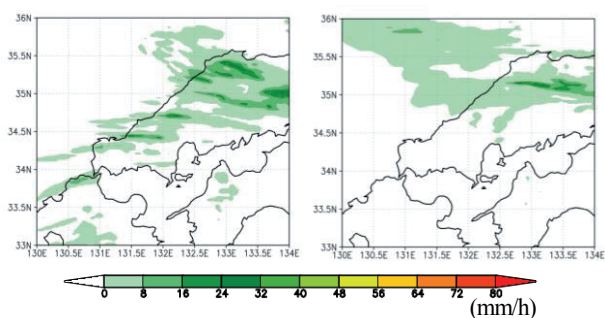


図-6 2013年8月24日3時における一時間雨量分布
(左；計算値 (2-nest)，右；計算値 (1-nest))

地境界層モデルの変化させる感度実験により，降水系の発達の違いを詳細に検討する必要がある。

(2) ネスト数の違いが雨量の計算精度に与える影響

図-6に2013年8月24日3時における2重ネスト（図-6左）と単一ネスト（図-6右）の一時間雨量分布を示す。なお，ここでは領域最内部（表-2中のd03）の結果を示している。2重ネスト（図-6左）では，3重ネストの計算結果（図-4）と比べて，島根県西部において最高32 mm/hの降雨が発生するものの，その雨域は小さくなっている。また，その位置も観測値と比べて，南西にずれており十分な再現性は得られなかった。また，単一ネスト（図-6右）に関しても，線状の降水帯が島根東部から鳥取県西部にかけて見られ，しかも降水量も小さく，島根県西部の強雨は再現できていない。

以上のことから，ネスト数を小さくし，考慮する計算領域を狭くすることは降雨の計算精度を低下させることに繋がることが確認された。

(3) 豪雨の発生要因の検討

a) 高層気象観測データとの比較

豪雨の発生要因の検証の前に，主な物理量（気温，水蒸気混合比，風速）の高層気象観測データ⁵⁾と比較することにより，その再現性について議論する。図-7に松江地点における2013年8月23日21時の高層気象観測データおよびWRFの計算結果（3重ネスト）の鉛直分布を示す。なお，対象時刻は豪雨の発生前となっている。これは，高層気象観測は一日2回（9時と21時）の観測を実施しており，最も降雨の発生時刻に近い時刻を選定したことによるものである。図より，気温に関しては，概ね観測値と一致しており，鉛直分布の特徴を捉えている。水蒸気混合比に関しては，900 hPa以外においては概ね観測値の鉛直分布に近い傾向を示すが，僅かに過大評価を示す傾向にある。また，風速の東西方向成分Uについては，中層（600 hPaから400 hPa）において最大約8 m/s程度の差が発生しているが，下層および上層においては概ね特徴を捉えている。しかしながら，南北方向成分Vに関しては，全層において一致が見られない。このため，観測値と比べて下層では南よりに，上層では北よりに風が吹

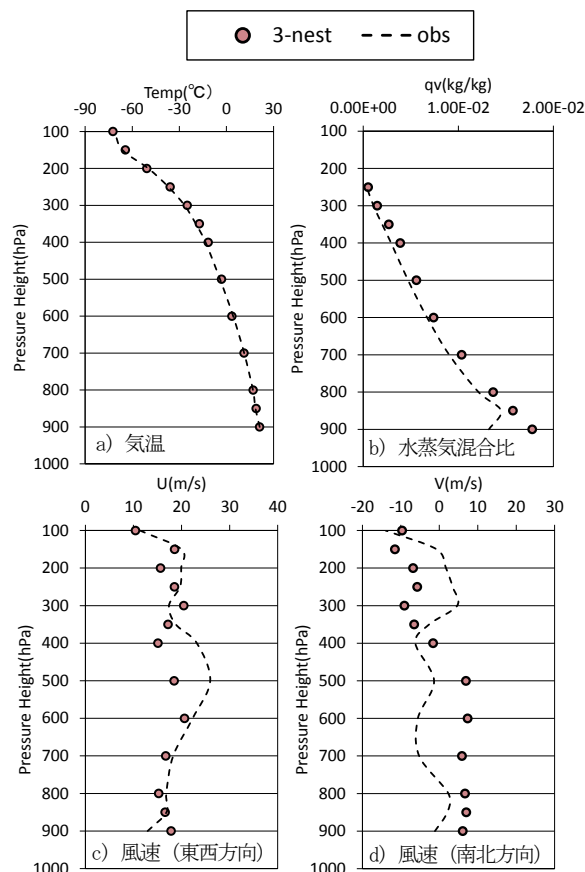


図-7 高層気象観測データと計算結果の比較
(2013年8月23日21時；松江地点)

いていることが分かる。

以上のことから，南北方向成分V以外では概ね鉛直分布の再現性は確保されていることが分かった。

b) 水蒸気フラックス分布に対する検討

本研究では，大気層下層における水蒸気輸送を検討するために，以下の式により水蒸気フラックスを算出した。

$$\vec{q}_{flux} = \frac{1}{g} \int_{800}^{Psfc} \vec{v} q dp \quad (1)$$

ここに，gは重力加速度，Psfcは地表面気圧， $\vec{v}$ は風速ベクトル，qは水蒸気混合比である。

図-8に式(1)を用いて算出した2013年8月24日3時における水蒸気フラックス分布を示す。図より，三重ネストの第一領域（図-8左）では，太平洋上に蛇行する流れが見られる。これは，太平洋高気圧によって生じる縁辺流である。この太平洋高気圧の縁辺に沿って高い水蒸気フラックスが確認できる。さらに，台湾の南西からも高い水蒸気フラックスが見られ，これらの水蒸気が西日本へと流れ込んでいる。次に，三重ネストの第三領域（図-8中）より，領域西端から水蒸気の流入が見られ，島根県西部で高い水蒸気フラックスが確認できる。また，日本海側から北西方向から水蒸気の流入が見られ，この2つの異なる方向からの風が収束したことにより降雨が発生

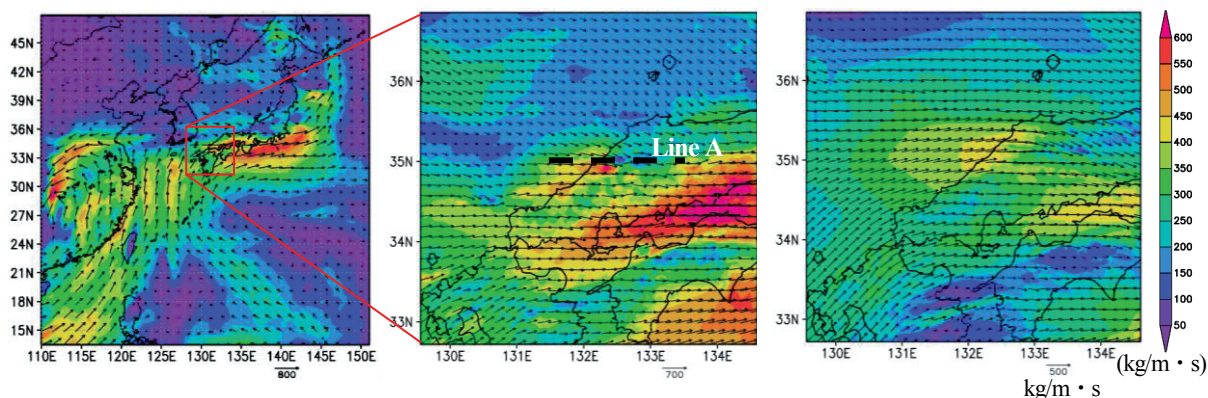


図-8 2013年8月24日3時における水蒸気フラックス分布
(左；第一領域 (3-nest) ， 中；第三領域 (3-nest) ， 右；第三領域 (1-nest))

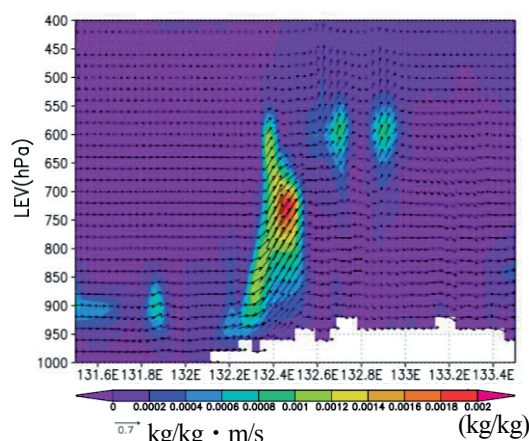


図-9 2013年8月24日3時における水蒸気フラックス分布および雲水混合比分布 (Line A)

したことが考えられる。なお、瀬戸内海海上においても高いフラックスが確認できるが、島根県西部と比較して、収束が小さいため強い降雨が発生しなかったと考えられる。そして、第一領域との水蒸気フラックス分布の形状も一致しており、適切に水蒸気フラックスのやりとりが行われていることが分かる。一方、単一ネストによる計算結果 (図-8右) では、領域西端からは南西よりの水蒸気が山口県を回りこむように島根県東部へ流入し、収束している。また、島根県西部での水蒸気の蓄積が十分に行われなかった。

これらのことから、太平洋高気圧による縁辺流を算出できるような計算領域を設定することが豪雨の発生の再現に重要であると考えられる。

c) 水蒸気フラックスの鉛直断面分布による検討

図-9に図-8中のLine Aを基準とした水蒸気フラックスのベクトルと雲水混合比の鉛直分布を示す。図より、東経132.2度から132.6度付近で上昇流が確認でき、その強さも周囲と比較して大きい。また、上昇流の発生域において雲水混合比が最大で0.002 kg/kgを示しており、上昇流によって雲が形成されていることが分かる。また、図-4に示す強雨域の位置と概ね一致している。さらに、上昇流の発生地点は、図-8の三重ネストの第三領域において

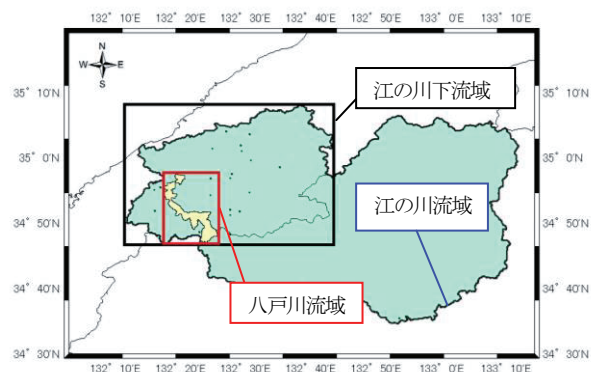


図-10 江の川および八戸川流域

見られた島根県西部の水蒸気フラックスが収束する地点と一致している。このことから、フラックスの収束で発生した上昇流により、水蒸気が上層へ輸送されたことが降雨の発生要因となっていることが分かった。また、上昇流発生域は中国山地付近 (図中の突起部) となっている。そのため、フラックスの収束に加え、地形の効果により上昇流の発生が促進されていることが示唆される。

(4) 計算雨量の流域への適用可能性の検討

一般的に、AMeDAS雨量計のようなピンポイントでの雨量を精度良く再現することが困難であることが知られている⁶⁾。また、流出解析では対象流域における空間平均雨量が代表値として用いられ、河川防災面でも流域スケールでの平均雨量が重要となる。そのため、本研究では空間平均雨量により予測雨量の流域への適用性について検討を行う。対象豪雨によって島根県管理河川や江の川下流部において河川災害が発生した⁷⁾。図-10に対象流域を示す。なお、対象とする空間スケールの違いを見るために、江の川下流域 (図-10中の黒枠) と支川である八戸川流域 (図-10中の赤枠) を対象に計算雨量の空間平均を実施した。

図-11に各流域における解析雨量とWRFの計算結果の空間平均時間雨量の経時変化を示す。なお、計算結果は3重ネストの第三領域の値を使用した。図より、江の川

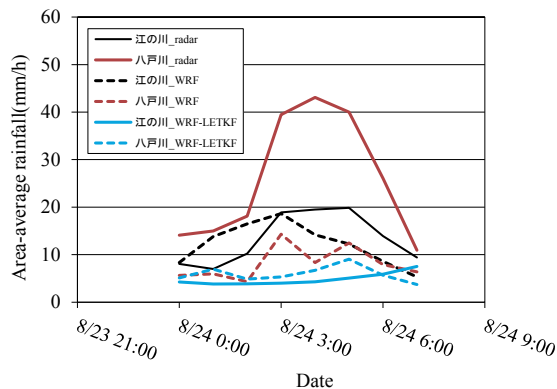


図-11 2013年8月24日0時から7時における
空間平均時間雨量

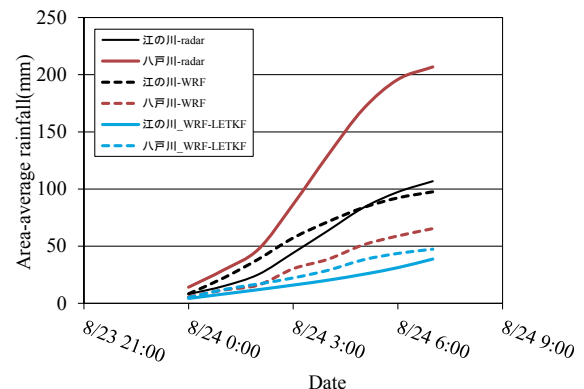


図-12 2013年8月24日0時から7時における
空間平均累積雨量

流域平均降水量の計算結果は、0時から3時までは増加するものの、3時にピークを示し、それ以降減少する。一方、解析雨量では3時以降も強い雨が降っている（図-4も参照）。ただし、ピークの値は両者とも同程度である。八戸川流域に着目すると、解析雨量では40 mm/hを超える降雨が発生するのにに対し、計算結果では約15 mm/hとなっている。これは、図-4で説明したように、計算結果では降水帯が北東にずれたことに起因すると考えられる。

図-12に各流域における解析雨量とWRFの計算結果の空間平均累積雨量の経時変化を示す。図より、江の川流域に関しては、両者とも7時の時点で100 mm付近を示しており、良好な結果を示している。それに対して上述のような理由で、八戸川流域に関しては、約4倍の差が見られる。また、既往の研究³⁾の計算結果を用いて算出した平均雨量（青実線および青破線）に関して、今回のダウンスケーリング実験の結果よりも時間雨量と累積雨量ともに低い値を示している。そのため、平均雨量に対するダウンスケーリングの効果を確認することが出来た。

以上のことから、降水帯の位置の違いが空間スケールの平均雨量に与える影響は大きく、今回の豪雨解析は流域面積の比較的大きな河川に対して有効となるレベルであることが示唆される。

5. 結論

本研究では、2013年に発生した島根県西部豪雨を対象とした力学的ダウンスケール実験を実施し、その有効性を検証した。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 3重ネストを用いることによって、位置や降水量に差が残るものの、雨域の移動パターンをある程度再現できる。
- (2) 単一および2重ネストの場合には豪雨の発生が見られず、ネスト数の違いが雨量の計算精度に与える影響は大きい。
- (3) 対象とした豪雨の発生には、太平洋高気圧の縁辺流

と日本海側からの水蒸気フラックスの収束が要因となっている。

- (4) 降水帯の位置の違いが空間スケールの平均雨量に与える影響は大きく、今回の計算結果では大きな流域に対しては有効である。

今回の実験では、概ね良好な再現性を示すことが出来た。しかしながら、流域への適用という点では不十分である。そのため、空間解像度の向上、物理モデルの変化による感度実験、データ同化とダウンスケーリングを組み合わせることで、計算精度のさらなる向上を図る予定である。

参考文献

- 1) 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横澤正幸: 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門, 農業気象, 66(2), pp.131-199, 2010.
- 2) 有馬雄祐, 大岡龍三, 菊本英紀, 山中徹: 力学的ダウンスケーリングによる近未来標準気象データの試作と精度検証, 生産研究, 67(1), pp.25-30, 2015.
- 3) 北真人, 河原能久, 椿涼太, 牛山朋来: WRF-LETKFによる2013年8月の島根県西部豪雨の数値解析, 土木学会論文集A2 (応用力学), 70(2), pp. I_277-I_287, 2014.
- 4) 竹見哲也: 2008年7月28日近畿・北陸地方で発生した局地的豪雨の高解像度気象シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp.421-429, 2009.
- 5) 気象庁: 過去の気象データ検索 (高層), <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/index.php>
- 6) 吉野純, 野村俊夫, 片山純, 木下佳則, 安田孝志: メソ気象モデルMM5によるピンポイント24時間降水量予測の精度について, 水工学論文集, 52, pp.325-330, 2008.
- 7) 土木学会中国支部: 平成 25 年 8 月島根県西部豪雨災害調査報告書, <http://www.jsce.or.jp/branch/chugoku/userdata/Publish/H25-8-shimane-nishi.pdf>

(2015. 4. 3受付)