

WRF を用いた短時間豪雨予測システムの構築に関する基礎研究 FUNDAMENTAL STUDY OF SHORT TERM HEAVY RAINFALL PREDICTION SYSTEM'S CONSTRUCTION BY WRF

都市環境学専攻 盧 涛

Lu Tao

Key Words : WRF, heavy rain, evaluation, physics scheme, reproduction

1. 研究の目的

従来から豪雨は気象災害の主な要因のひとつである。また、気候変動の影響で極端気象の発生が懸念されている。近年では、平成 27 年 9 月関東東北豪雨では広範囲にわたって洪水被害をもたらした。豪雨災害の危機管理にとって、雨の観測および解析、予測は重要である。北田・山田らは実況補外 6 時間先の予測降雨を用いたダム事前放流の有用性を示した。また、ダム事前放流の効果は降雨域の位置に依存している。しかし、降雨予測において、降雨域のずれは未だに問題となっている。また、降雨域のずれの原因を調べる研究も少ない。本研究では、数値予報モデル (Weather Research and Forecasting (WRF) Model) を用いて、豪雨の再現精度を評価することを目的とした。研究事例は平成 27 年 9 月関東・東北豪雨である。また、評価内容は、降雨域の形状、降雨強度、圧力場、温度分布、風場の再現性また積雲スキームと雲物理スキームの降雨再現への影響とした。その結果を踏まえて短時間豪雨予測システムの構築を最終目的とする。

2. 研究方法

(1) 数値モデルの概要

Weather Research and Forecasting (WRF) Model は次世代のメソスケール数値予報モデルである。WRF は静力学に基づいた地形追従垂直座標を用いた非静力学モデルである。WRF の基礎方程式系は運動方程式・連続の式・熱力学の式・混合比の保存式からなる。基礎式には、静力学平衡の仮定を用いていない。また、非圧縮性の近似もされていない。これは、WRF が積雲対流などの深い対流を数 100 m から数 10 km の任意の水平分解能で計算できることを意味する²⁾。また、対流、放射、雲物理、境界層、地表面等の多様な物理モデルを搭載しているため、WRF は研究また実業務でも広く使われるモデルである。

(2) 鬼怒川豪雨の概要

台風 18 号 (Etau) 及び台風 17 号 (Kilo) の影響で、2015 年 9 月 7 日から 11 日まで、栃木県内の鬼怒川流域で広範囲の豪雨が記録された。C-band レーダの降雨強度の観測結果 (図-1 の(a)), 空間解像度は 1 km, 黒色は欠測) から、広範囲の降雨は台風 18 号上陸 (9 月 9 日) 以降、鬼怒川流域内に停滞する線状降水帯となった。9 月 7 日 18 時から 11 日 06 時まで、618.5 mm の雨量が日光市にある五十里観測所で観測された。また 9 月 10 日に同じ観測所で、0 時 17 分から 1 時間の間に 62.0 mm の豪雨が観測された³⁾。

表-1 数値シミュレーション条件

計算期間	気象データ	地形データ	海面水温
2015 年 9 月 8 日 12 時- 10 日 06 時	NCEP Final Analysis (1°×1°)	USGS 24 category data	NOAA RTG SST (0.5°×0.5°)
積雲対流スキーム : Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic, Grell-Devenyi ensemble scheme, New Grell 3D ensemble scheme 微物理過程スキーム : Lin (Purdue), WRF Single-Moment 3-class (WSM3), WSM6, Morrison 2- moment 境界層スキーム : Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme			

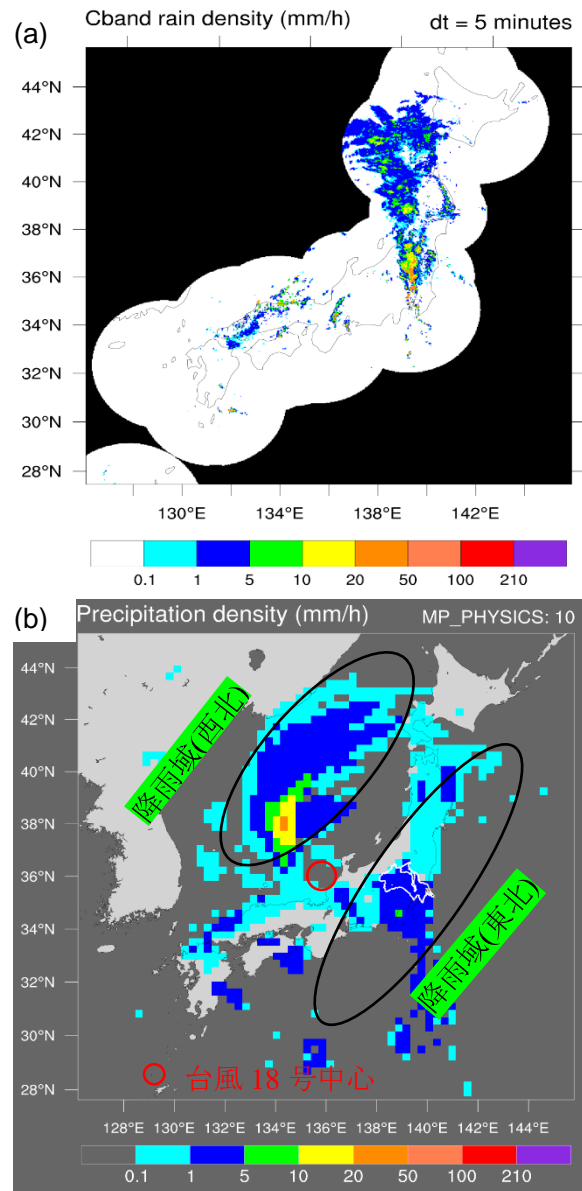


図-1 9月9日10時(UTC),
(a) C-band 観測降雨強度 (mm/h) (b) WRF 計算の降雨強度

(3) 数値シミュレーション条件

本研究では、WRF ARW model (version: 3.7.1)を用いた。日本を網羅する計算領域を用いて、水平格子解像度は 30 km である。鉛直方向には 40 層のシグマ座標系を用いてシミュレーションを行った。風速（水平 2 つ、鉛直 1 つ）3 成分、気圧、気温、大気密度、湿度、土壌温度、土壌湿度を初期・境界条件として与える。初期・境界条件のソースデータは表-1 をもって示す。空間において 6 次 Runge-Kutta、時間において 4 次 Runge-Kutta を用いて離散化した。物理スキームの降雨再現への影響を調べるため、それぞれ 4 つの積雲対流スキーム、雲（微）物理スキームを用いて計算を行った。

3. 研究結果

本研究では WRF ARW model (version: 3.7.1)を用いて 2015 年 9 月関東・東北豪雨（鬼怒川豪雨）の再現実験を行った。再現実験結果の妥当性あるいは豪雨再現の精度を評価するために、C-band レーダの降雨強度観測結果、実況天気図および X-band レーダから解析で得られた鉛直風速ベクトルとの比較を行った。また再現実験により、積雲対流スキーム、雲（微）物理過程スキームの降雨再現への影響を調べた。本研究で示している時間はすべて協定世界時（UTC）である。

(1) WRFの降雨強度とC-bandレーダとの比較

C-band レーダにより観測された降雨強度は 1 km の空間解像度を有する。シミュレーションで用いたメッシュ水平格子サイズは 30 km である。両者を比較するために C-band レーダの結果を WRF の 30 km 水平格子に平均化を施した。積雲対流スキームと雲（微）物理スキームを多数計算したが、大きな違いが見られなかった。Kain-Fritsch（積雲対流スキーム）と Morrison 2-moment（雲物理スキーム）を用いた結果を紹介する。

図-1, (b)で示すように、9月9日10時（UTC）の時台風18号を中心の周りに、西北、東北2つ大きな降雨域がある。西北の降雨域はC-bandレーダの観測範囲以外にあるから、西北の降雨域の降雨強度は欠測となる。東北降雨域において、C-bandレーダで観測された降雨帯と大体同じような形状が見られた。図-1, (a)とよく似ている（線状降水帯）が、C-bandレーダで観測された降雨域より少々南にずれることが分かる。また、東北降雨域の降雨強度はC-bandレーダの観測結果と比べて過小評価となる。

降雨強度が過小評価された原因を明らかにするため、以下では WRF で得られた圧力、温度、風（水平・鉛直）を観測データと比べることとした。

(2) WRF計算結果と圧力面の実況解析図との比較

大気対流層の上層（約9000 m）の状態を知るために、300 hPa面の実況解析図とそれに対応するWRFの計算結果を図-3の(a), (b)に示す。300 hPa面の解析図の見方を説明すると、実線は等高度線を表している、等高度線の間隔は120 mである。点線は等風速線を表す、間隔は20 ktである。気圧の谷（図-3の(a)の黄色で描いている線）が見られる。気圧の谷は、天

気図上で低圧から高圧側に向かって窪んでいる地域、状態のことである。中緯度の気象擾乱の発生と密接な関係にある。図-3の(b)で示している計算結果では、

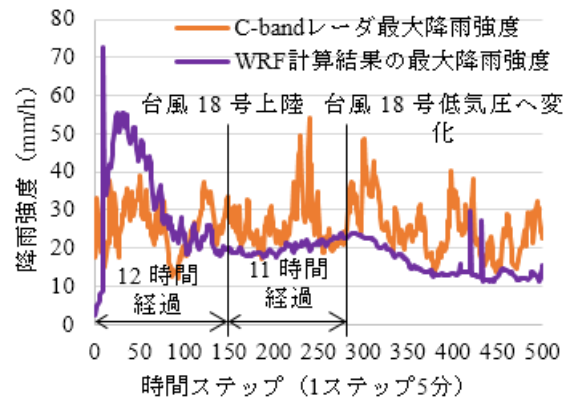
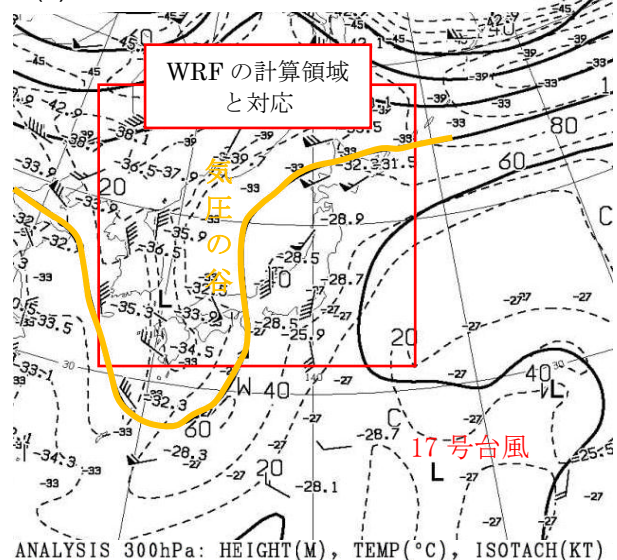


図-2 C-band レーダと WRF 計算結果の最大降雨強度

(a) 9日0時(UTC) 300 hPa 面の解析図



(b) 9日0時(UTC) 300 hPa 面の計算結果

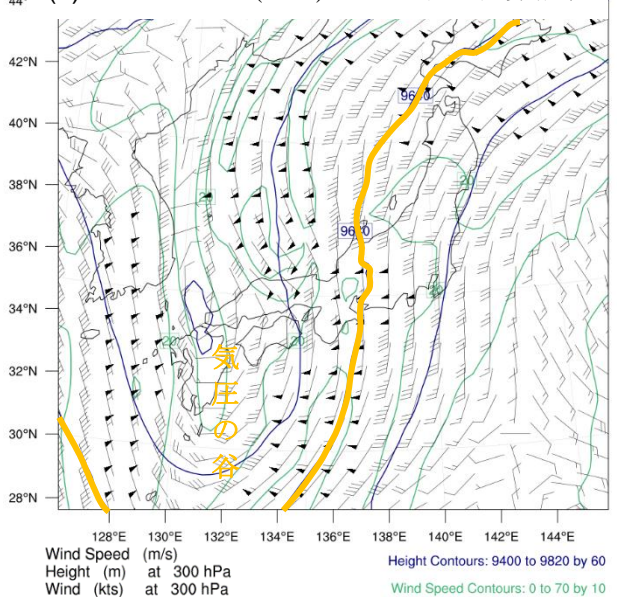


図-3 300 hPa 面の気象庁の実況解析図(a)と対応する WRF の計算結果(b)

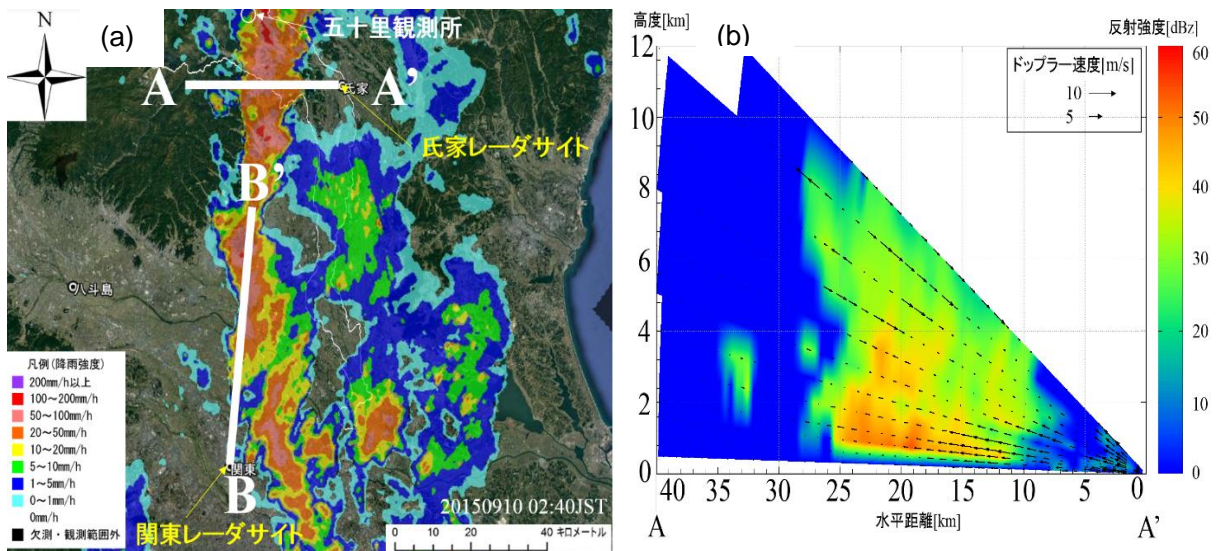


図-4 9日17時40分(UTC), X-band レーダの降雨強度(a)と A-A'断面の風速ベクトルと反射強度の図

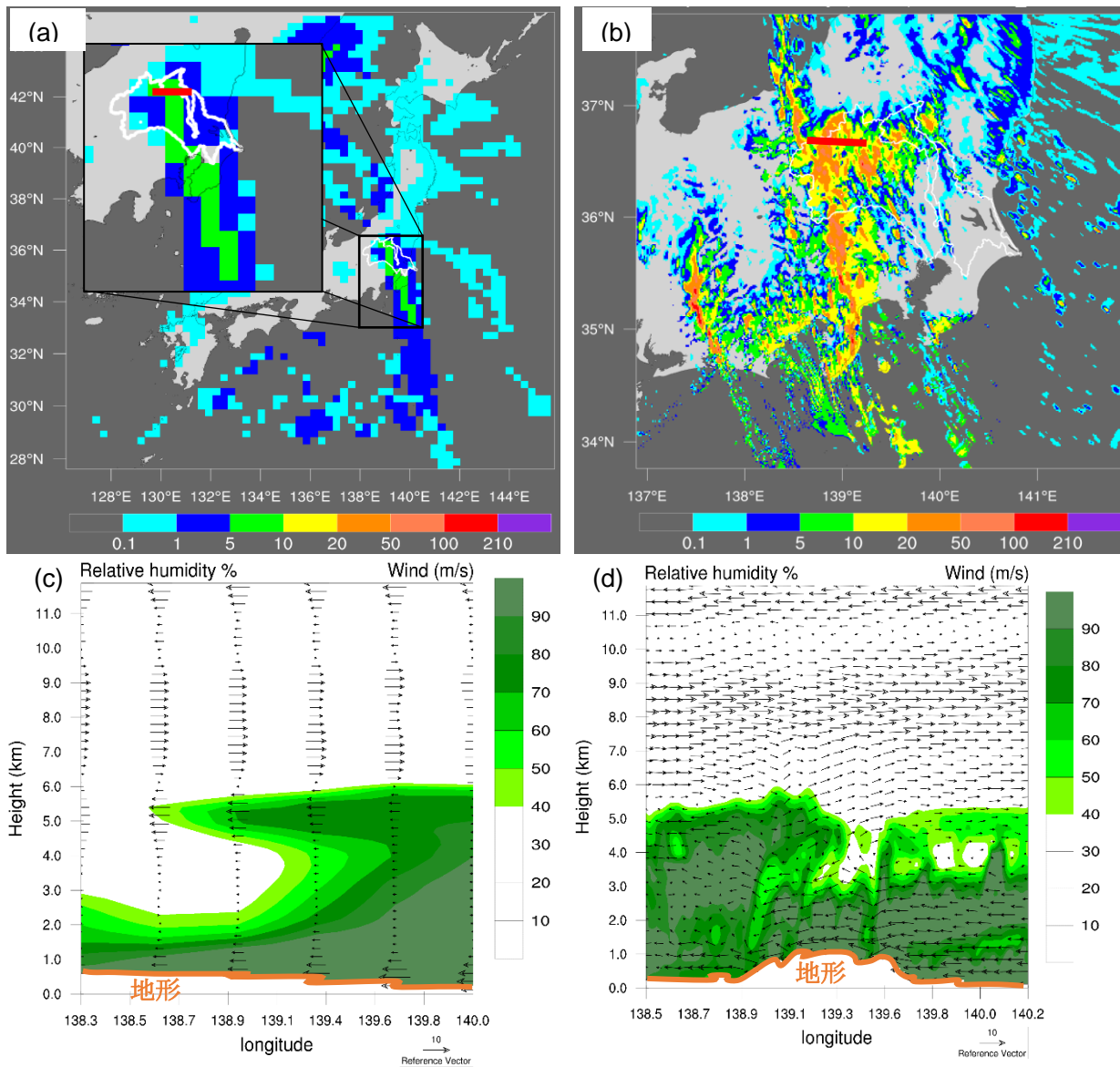


図-5 9日17時40分(UTC)

(a)は 30 km 水平解像度の WRF 降雨強度結果, (b)は 1.11 km 水平解像度の WRF 降雨強度結果
 (c)は(a)赤線示す横断面の風速ベクトルの図, (d)は(b)赤線示す横断面の風速ベクトルと相対湿度の図

この気圧の谷の再現が見られる。しかし、WRF解析領域と対応する実況天気図の東南部分をさらに注目すると、等高度線の変形（気圧の変形と見なすことができる）が見られ、この変形は17号台風による上層気圧の谷の変形である。同じ時刻でこういう変形が見られないが、9日15時の計算結果ははじめてこの変形が見られる。ここでは上層の圧力分布の問題点を指摘しているが、シミュレーションで得られた上層の気圧の分布、風速分布および中下層の圧力分布、温度分布、風速分布が天気図と比べて概ね一致していることを強調したいところにある。

上記のような気圧の変形はシミュレーション上で再現できていないのは、17号のような強い台風の上層の再現が不十分であるため、あるいは上層の観測データが不足によるものと考えられる。

(3) WRFの鉛直風結果

C-bandレーダおよび天気図では鉛直風速ベクトルの情報が得られないため、X-bandレーダの解析から得られた鉛直風速ベクトルを用いて、WRFの計算結果と比較した。X-bandレーダから得られた風速ベクトルとWRFで得られた結果は図-4で示す。図-4の(b)は(a)中のA'-A鉛直断面の風速ベクトルと反射強度を示している。特徴としては、時計回りのループを描いていることである。注意してほしいのは図-4の(b)の結果はX-bandレーダ一台を用いて解析した結果になる。鉛直面の風速ベクトルを完全に表現できないが、ある程度風速ベクトルの動向を見ることができる。図-5はWRFの結果を示している。(a)と(c)は水平格子解像度30kmの結果で、別々降雨強度、赤線で示している鉛直断面図（風速ベクトルと相対湿度）となる。(b)と(d)は1.11 km水平格子の結果である。

降雨強度分布だけで見ると30 km水平格子を用いた計算で得られた降雨強度分布はX-bandと一致する。1.11 km水平格子を用いた計算では線状の降雨帯が見られたが、図-4の(a)で見えられた線状降水帯と比べると西より約60 kmのずれが見られた。

鉛直風速で見ると30 km水平格子を用いた計算結果では上向きの風がほとんど見られず、北向きの風が支配的である。1.11 km水平格子を用いた計算結果では図-4の(b)の結果で示したような時計回りのループが見られたが、それは小範囲で見られた。鉛直風（約2 m/sの風速）が見られた。また、高度6 km以上ではほとんど鉛直風が見られない。

研究結果の(1)、(2)、(3)と図-2で示している最大降雨強度の比較の結果一緒に考えると、18号台風が上陸する前、WRFで計算された最大降雨強度はC-bandレーダで観測された降雨強度を上回った。17号台風の接近と共に2つ台風域の対流層の接合することによって、現実的に強い降雨を維持したと考えられる。18号台風が低気圧へと変わったが、17号台風が十分接近していたため、強い降雨が降り続けた。それに対して、WRFの計算では18号台風上陸後降雨強度が観測より小さいことを示しているのは、30 km格子を用いた計算では鉛直風速を明的に解けていないと考えられる。また、図-5の(c)と(d)の中で

示している地形の表現の違いにも鉛直風速の結果に影響すると考えられる。

30 km水平格子を用いた計算では降雨強度は過小評価されたが、降雨域のずれは小さいことから、降雨域の位置を評価する際に、あらい水平格子を用いた計算結果は細かい水平格子を用いた計算結果よりよいことを示唆している。もちろん、30 km水平格子の結果はいいといっていない。降雨域の位置を評価する最適な水平格子サイズが引き続き検討する必要があると考えている。

(4) 各積雲対流と雲物理スキームの比較

本研究例では30 kmの水平解像度では各スキームによる降雨強度の結果はほぼ一致した。竹見により、500 m水平解像度では、局地豪雨の再現においては物理過程スキームの依存性が極めて大きいことを示した。本研究では、あらい水平格子を用いた計算による降雨強度は過小評価されるが、物理スキームの依存性が小さいことがわかった。

4. まとめ

本研究ではWRF ARW modelを用いて2015年9月関東・東北豪雨（鬼怒川豪雨）の再現実験を行った。その計算結果とC-bandレーダの降雨強度観測結果及び実況天気図とX-bandから得られた鉛直面の風速ベクトルとの比較を行った。また再現実験により、積雲対流スキーム、雲物理過程スキームの降雨再現への影響を調べた。30 km水平格子の計算において、以下の結論を得られた：

第一に、降雨域の形状、位置が概ね再現していることが分かった。また、対流圏中下層の圧力分布、温度分布が観測と概ね一致していることが分かった。

第二に、降雨域の降雨強度はC-bandレーダの観測値と比べて過小評価になることが分かった。その原因は30 km水平格子を用いてシミュレーションにおいて鉛直の風が十分に表現されていないと考えられる。

最後に、各積雲対流スキームと雲（微）物理の降雨再現への影響が少ないことが分かった。

今後の課題は既存の対流物理スキームによる鉛直方向の表現性を評価すること。また空間解像度による鉛直方向流れの再現精度と降雨域の関係を検討したい。

参考文献

- 1) 北田悠星, 菊地慶, 岡部真人, 山田正: 降水短時間予報を用いた新しいダム放流手法の効果検証, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009
- 2) 日下博幸, 平口博丸, 和田浩治: 次世代のメソスケール気象モデルWRFを用いた平成16年新潟・福島豪雨のシミュレーション, 電力中央研究所報告, 2006
- 3) 一般財団法人国土技術研究センター: 台風17号及び18号による鬼怒川被害現地調査報告(第2報) ~平成27年9月10日の大雨による被害~, 2015.9.29
- 4) 竹見哲也: 境界層・雲微物理過程のモデルに対する局地豪雨の感度実験, 京都大学防災研究所年報, 2010