

ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究

EARLIER DETECTION OF THE ORIGIN OF VERY LOCALIZED TORRENTIAL RAINFALL

中北英一¹・山邊洋之²・山口弘誠³

Eiichi NAKAKITA, Hiroyuki YAMABE and Kosei YAMAGUCHI

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 工博 京都大学生存基盤科学研究ユニット (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

In Japan, very tragic disasters occurred in the summer of 2008 due to quite localized and suddenly generated torrential rainfall in urban areas. The rainfall events were caused by isolated cumulonimbus cloud generated alone over the urban areas, although typical localized heavy rainfall is composed of organized several cumulonimbus and the size and the life time are larger than those of isolated cumulonimbus. Therefore it is easier for the organized system to be predicted by weather radar.

This paper shows what we were able to do for judging arrival of the isolated severe storm in an earlier timing using current operational weather radar and what we should do to make an announcement earlier even it would be by a few minutes.

Key Words: *localized heavy rainfall, weather radar, flash flood, polarimetric radar*

1. ゲリラ豪雨災害

2008年、突然の豪雨による出水により人命が奪われるという悲惨な災害が起こった。7月28日兵庫県神戸市灘区のと賀川が豪雨により急増水しその激流に流され5人が亡くなり(以下、この事例をと賀川豪雨と呼ぶ)、また8月5日東京都豊島区では増水した下水道で作業員が流され、やはり5人が亡くなった。これらの災害は局地的な集中豪雨の中でも最近目立つ、「ゲリラ豪雨」が要因の一つに挙げられる。河川を管理し、工事を発注する自治体はこのような出水に対して対策を講じているが、予想をはるかに超えた急激な出水、ならびに親水空間の利用や下水道の整備の際に水流のそばに人がいたことに、これらの災害の共通点がある。予想を超えた急激な激しい出水の原因は、積乱雲が突然発生、急激に発達し豪雨をもたらしたこと、その豪雨が災害発生場所の上流にもたらされたこと、そして上流に降った豪雨が直ぐに出水するほど集水域の面積が小さかったこと、都市域であったため降雨が素早く下水道システムに流れ込んだこと、が考えられ、いくつかの要因が重なり悲惨な災害が起こった。しかし、洪水流は越水、氾濫することなく流下しており治水の観点からは問題ないことも特徴である。

「ゲリラ豪雨」とは「突如出現、急激に発達し、ピンポイントで強い降水をもたらす、予測困難で災害をもたらす」豪雨のことである。専門用語ではなく、「ゲリラ」は戦争を想起させることや予測不可能とさじを投げる表現と認識されることを防ぐため、気象庁や国土交通省では「局地的集中豪雨」等が用いられる。しかし、本論文では「ゲリラ」から想像される「短時間(突如、急激)」、「局地的」加えて「人命」という言葉を重要視しており、これらの視点を意識して初めて本論文が意味をなす。前述した豪雨災害の2事例は、「短時間」、「人命」という観点から「局地的集中豪雨」では表現しきれないと考え、本論文では「ゲリラ豪雨」を用いる。

都市部では急激な水位の上昇が起こりやすい中小河川や下水道が多く存在し、ヒートアイランド現象や地球規模で起きている気候変動が要因となりゲリラ豪雨は今後も発生する可能性がある。また、親水性の河川整備が進むことを考えるとゲリラ豪雨によって引き起こされる災害の増加も危惧される。そのため、ゲリラ豪雨への対策を進めることは水害による事故の防止及び軽減のため、人々が安心して暮らせる社会のために大変重要かつ緊急な課題であると言える。

(1) と賀川豪雨

都賀川は表六甲河川に属し、流路が短く急勾配で、流域面積が小さいという特徴がある。上流の六甲川と杣谷川の合流点から河口までの河道長 1.79km の河川で、3つの河川全体の流域面積は 8.57km²である。

都賀川豪雨時には 14 時 40 分から 14 時 50 分の 10 分間に都賀川流域上流部の永峰地点では 17mm、都賀川流域周辺の鶴甲地点では 24mm の強い降雨を観測している。図-1 に都賀川豪雨時の国交省レーダー画像を示す¹⁾。線で囲われた部分が都賀川流域を示しており、観測時間分解能は 5 分である。さて、14 時 35 分に流域全体が降水域で覆われる。出水が 14 時 42 分であるため、レーダー画像を確認し警報を発令するまで 7 分の余裕があると誤解するかもしれないが、実際はレーダー画像が防災官署や一般に配信されるまで通常 10 分弱の情報伝達時間が必要であるため、14 時 35 分の降水域を捉えたレーダー画像は 14 時 45 分になり初めて入手できる。すなわち、出水までに警報を発令するにあたり、流域に降水域が到来してから警報発令を行っては間に合わないことがわかる。加えて、都賀川に架かる甲橋地点では 14 時 40 分から 14 時 50 分の 10 分間で水位が 1.3m 上昇しており、5 分、10 分でも早い避難情報が希求される。そのため、降水域のより早期の探知、積乱雲の発生、発達、移動の予測が重要となる。しかし、突然発生し急激な発達をする積乱雲のピンポイントの予測は、通常集中豪雨時に発生する積乱雲群に比べ難しい。

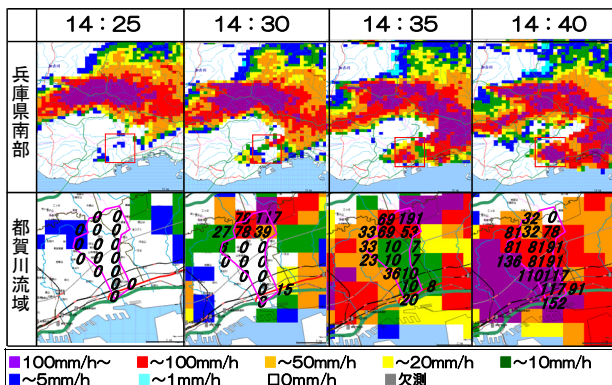


図-1 都賀川豪雨時の全国合成レーダー情報。

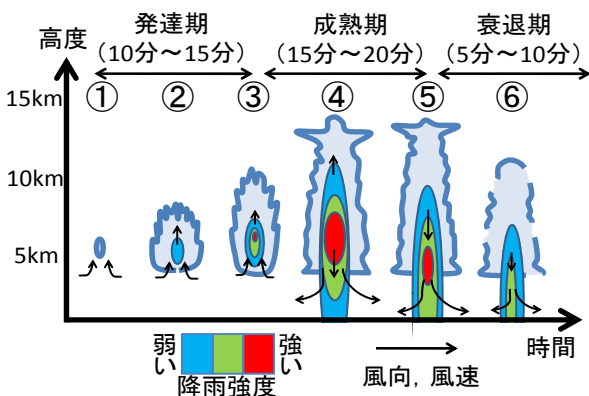


図-2 単独積乱雲の発達過程。

(2) 積乱雲の発達過程

通常の集中豪雨は組織化された積乱雲群によってもたらされるのに対し、ゲリラ豪雨は孤立的に発生発達する積乱雲によってもたらされるのが特徴である。この単独の積乱雲の発達過程を概念的に示したのが図-2 である(白石²⁾)。大きく分けて発達期、成熟期、衰退期の3つに分類される。発達期初期、大気が不安定な中、図中①では、湿った空気が上昇し雲粒になる。この雲粒は非常に小さく現在のレーダーでは探知できない。図中②の段階では、雲粒が集まり降水粒子が上空にのみ形成される。この段階になり初めてレーダーで探知される。この上空でレーダーにより探知された降水粒子のことを本研究では「ゲリラ豪雨の卵」と呼ぶ。図中③では、この卵は発達して段々と雲頂高度も高くなる。しかし、上空にのみ降水粒子を蓄えながら発達するため、この段階では地上には降水はもたらされない。発生から 30 分程度経った成熟期になると、図中④、⑤のように雲頂高度が圏界面に達するほどに成長する。雲内部では十分に蓄えられた降水粒子が上昇気流で支えられなくなり落下し、その強い降水に伴って下降気流が現れる。そして、減衰期の図中⑥では上昇気流や下降気流は弱くなり、降水も弱まる。以上のような発達衰弱が 1 時間弱で行われる。

積乱雲の内部構造は、研究用ドップラーレーダーに加え、航空機やゾンデなどを用いた観測的研究や、数値モデルを用いた研究により解明が進んでいる(例えば、William et. al³⁾、浅井⁴⁾、高橋⁵⁾、など)。内部構造の中でも発達過程は古くから解析されており、発達期の初期には上空でのみ降水粒子が存在することは早くから知られていたが、本研究のように災害軽減の視点に立って、現業レーダーで上空にのみ存在する「卵」が探知されるかどうかの研究は未だない。

(3) 本研究の目的と研究手法

レーダー情報を用いたゲリラ豪雨対策として、降水域の早期探知および情報伝達の時間短縮が極めて重要である。現在、実際に運用されている現業レーダーでは降水域の立体構造の把握よりも河川へのインパクトを定量的に評価することで河川、ダム管理などに役立てることを目的としている。本研究はこの現業レーダー観測によって、ゲリラ豪雨対策となりえる有用な情報が得られていなかったかを検討することで、今後の利用手法や新規の観測計画に役立てることを大きな目的とする。具体的には、ゲリラ豪雨を引き起こす積乱雲のより早期の探知が可能かどうかを検討することを目的として、「低仰角観測」と「現業観測で一部行われている立体観測」による降水域の捉えられ方の比較、すなわち積乱雲の初期段階に上空でのみ形成される降水域を捉えられているかどうかを検証する。加えて、波長の異なるレーダーを用いて空間分解能、感度の違いによる捉えられ方を比較し、我が国のレーダー観測包囲網の将来性を検討する。

2. レーダー情報について

正確な降水量推定、降水予測は空間的にも時間的にも細やかな情報が得られる気象レーダーが用いられている。気象庁や国土交通省では最大探知半径 200km ほどの観測範囲を有す C バンド (5cm) 波長のレーダーを全国に配置し、台風や発達した低気圧の接近に伴う降雨を観測することで土砂災害対策や河川管理を行っている。しかし、この C バンドレーダーは低仰角観測を主体としており、観測高度が低いと高い高度の降水域の情報が得られにくい。また、レーダーの空間分解能が一つ一つの積乱雲の降水域を捉えられるほど細かくなく、ゲリラ豪雨という局地的な状況を把握するのは難しい。この問題を補うべく主要地方自治団体は、C バンドに比べて観測範囲は狭いものの、空間分解能が高く感度の良い X バンド (3cm) 波長のレーダーを導入している。ただし、X バンドレーダーは降雨減衰が激しいため、定量的な降雨量の推定には不向きであるとされている。

本研究では気象庁が管理している C バンドのレーダーによる全国合成情報、大阪市が管理する X バンドのオークレーダー、および国交省が管理する C バンドの深山レーダーを用いて、時間分解能、空間分解能、感度及び観測方法の違いに着目した解析を行う。

(1) 低仰角観測のレーダー情報

本研究では、低仰角観測のレーダー情報として気象庁合成レーダーとオークレーダーを用いる。

a) 気象庁合成レーダー

気象庁が保有する全国 20 台の C バンドレーダーによる観測情報を合成処理した「1km メッシュ全国合成レーダーエコー強度 GPV」(レーダーで観測される換算降水強度)が 2004 年 6 月から配信されており、本研究では「気象庁合成レーダー」と呼ぶこととする。

b) オークレーダー

オークレーダーは 1993 年 4 月 1 日より観測を開始した大阪市が設置している X バンドレーダーで、集中豪雨時の雨水ポンプ運転支援を主目的としている。観測仰角は 1.5°、観測時間間隔は 2.5 分、空間分解能はレーダーから 20km 以内が 0.25km、20km から 40km が 0.5km、40km 以上が 1km の空間分解能である。本研究ではすべてにわたり 0.25km 間隔のメッシュ値とした。前述したように、X バンドレーダーは感度は良いが降雨減衰が生じ易く、特にレーダーを囲うレドームが水膜に蔽われると大きな減衰が生じる。またオークレーダーは六甲山方面を観測する際にレーダービームが六甲山により遮蔽され、より遠方の反射強度が弱くなる特徴がある。

(2) 立体観測のレーダー情報

a) 深山レーダー

深山レーダーはレーダービームの仰角を変化させることができる 3 次元レーダーであり、降雨の立体構造を観測できるという利点をもつ。空間分解能はビーム方向に 1.5km、方位角方向に 360°/256 である。現業観測では、5 分間のうち 3 分間は全国合成レーダー情報に資するため低仰角による仰角固定観測を行い、残り 2 分間は予測モデルへの利用のため仰角可変の立体観測を行っている。仰角固定観測では半径 120km の定性観測範囲と半径 198km の定量観測範囲でレーダー反射因子のみを観測している。一方、仰角可変の立体観測ではビーム方向 120km の範囲内を 7.5 分に 1 回の観測頻度でレーダー反射因子だけでなくドップラー風速の観測も行っている。深山レーダーによる立体観測情報は、ビーム仰角ごとに観測時刻がわずかに異なっているが、本研究では立体観測が 1 サイクル終了する時刻を観測時刻として表記する。

b) 空間内挿処理

レーダーの受信電力はレーダービームの距離方向、方位方向、仰角方向の極座標系で得られるので、レーダー反射因子などの 3 次元画像を作成する際や、各種解析を行うには不便である。そこで、データの空間配置を 3 次元デカルト直交座標系に変換することで各種処理を容易にした。空間配置の変更には中北ら⁶⁾の方法を用いた。すなわち、レーダービームが通っていない格子点にも値を挿入するため、上下のビーム上の値を用いて鉛直方向に線形補間を行った。鉛直方向による補間は対流性の降水域を表現するのに適当である。

3. レーダーを用いた都賀川豪雨の解析

まず、概要を述べる。日本海側にある中規模の前線に伴って存在したライン状の降水域が南下しており、そのライン状の降水域から南側に離れた六甲山付近で突然降水域が現れ、発達しながら都賀川に向かう。そして、ライン状の降水域と合流し都賀川に豪雨をもたらした。

(1) 低仰角観測レーダーによる解析

図-3、図-4 は都賀川を中心とした 2008 年 7 月 28 日 14 時 10 分から 14 時 40 分まで 10 分毎の気象庁合成レーダーおよび 14 時 12.5 分から 14 時 20 分まで 2.5 分毎のオークレーダーのレーダー画像をそれぞれ示す。地表面には地形の等高線を描き、☆印が都賀川の位置を示す。図中には大阪湾および淡路島が確認できる。

a) 気象庁合成レーダー

出水の約 20 分前である 14 時 20 分に○印で示した都賀川の西方に降水域が突然現れる。矢印は降水域の進行方向を表す。14 時 30 分にはこの降水域は急速に発達しながら都賀川に近づくように東進し、ライン状の降水域と合流する。そして 14 時 40 分に都賀川で豪雨となる。

b) オークレーダー

高時間分解能、高空間分解能、高感度の X バンドレーダーであるオークレーダーは、14 時 15 分には○印で示した位置で最初に降水域を捉えている。この降水域が発達しながら都賀川に向かう様子を気象庁合成レーダーよりもより早期に、より詳細に捉えられている。ただし、降雨減衰が激しいため気象庁合成レーダーと比べるとライン状の降水域が捉えられていない。そのため X バンドによる観測には複数のレーダーによる反対方向からの観測体制が望ましい。

(2) 立体観測レーダーによる解析

図-5 は 2008 年 7 月 28 日 14 時 13.5 分から 14 時 36 分まで 7.5 分毎の深山レーダーによって立体観測されたレーダー反射因子が 20dBZ 以上の降水域を 4 段階の等値面で立体的に表現したものである。図中上段は南東上空から北西方向を見たもの、下段が南から北方向を真横から見たもの、すなわち大阪湾から六甲山方向を眺めたものである。図の中心は都賀川であり、x 軸、y 軸、z 軸はそれぞれ東方向、北方向、鉛直方向となっている。下面には地表面を描いているが、3 次元で表現した降水域と地形の両方を見易くするために地表面を z 軸方向に 5km 下げた位置としている。また地表面には高度 1750m

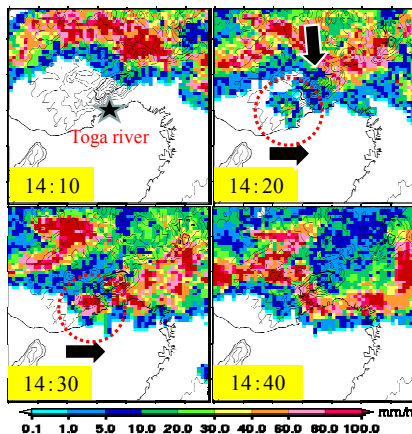


図-3 都賀川豪雨時の気象庁合成レーダー画像。

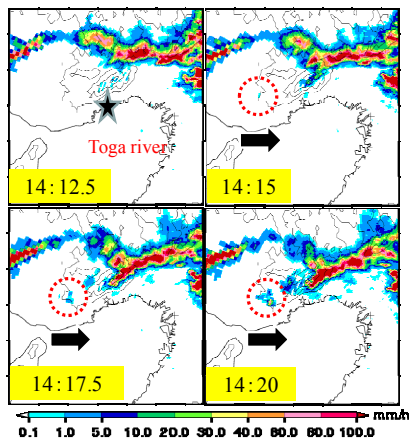


図-4 都賀川豪雨時のオークレーダー画像。

におけるレーダー反射因子を降雨強度に変換した値を等値線として描いている。この立体観測画像によって降水域の空間的な全体像を見ることができ、また内部の強度分布を表現することで効果的にメソ γ スケールの降雨域の様子を直感的に把握することが可能である。ただし、レーダーでは粒径の小さな雲粒をとらえることはできないため雲は表現されていないことに注意を要する。

さて、14 時 13.5 分の画像には矢印で示したように、高度約 5km のところに降水域が確認できる。これが都賀川に豪雨をもたらした積乱雲の初期の状態であり、ゲリラ豪雨の卵である。14 時 21 分には急激に成長し、14 時 28.5 分には内部に強雨域をもった状態に発達する。この時刻には地表面に降水域が確認できることから、積乱雲の上空に蓄えられた降水粒子が都賀川周辺に落下し始めていることを意味する。14 時 36 分には地上での降雨強度がさらに強まっており、出水時刻が 14 時 42 分であるため、都賀川での急激な水位上昇に寄与する降雨は主にこの積乱雲からのものである。その後南下したライン状の降雨域は都賀川に到来し積乱雲と合流する。時間分解能が粗いため、積乱雲の詳細な発達挙動を捉えているとは言い難いが、立体観測は積乱雲内部の強降水域の空間分布をよく表現している。すなわち、図-2 に示したゲリラ豪雨の卵の生成（図中②）から上空に降水粒子を蓄えながら発達し（図中③）、上昇流が降水粒子を支えられなくなり降水に至る（図中④、⑤）という挙動を大枠で捉えられており、特に、卵を探知したのは出水時刻 14 時 42 分の約 30 分も前である。よって、立体観測の時間分解能を向上することで、より詳細な積乱雲の発達が捉えられ、より早期の卵探知が可能であると考えられる。

たとえば、2006 年 8 月 22 日の豊中豪雨は短時間で局地的な豪雨事例であり、大阪府豊中市では 14 時 10 分から 15 時 10 分までの 1 時間に 110mm の雨を観測している。図-6 は豊中豪雨時の深山レーダーによる立体画像である。図中には○印で示すように卵が複数存在しており、その中の矢印で示した卵が発達し豪雨をもたらす様子を捉えている。このように、都賀川豪雨事例のみならず他の事例においてもやはり、立体観測では積乱雲の発達過程が捉えられ、発達初期には大気上空でゲリラ豪雨の卵を確認できる。

(3) X バンドレーダー立体観測の有効性

図-7 に都賀川豪雨事例でゲリラ豪雨を最終的にもたらず積乱雲が初めて捉えられた時刻からのレーダー画像を加えて、その降水域を捉えた写真を示す。探知時刻は深山レーダー、オークレーダー、気象庁合成レーダーという順番に早い。低仰角観測では X バンドのオークレーダーが C バンドの気象庁合成レーダーよりも早期に積乱雲を探知しているが、都賀川に豪雨をもたらしたゲリラ豪雨の卵は高度が約 5km で生成したため、低仰角観測では降水域を捉えるのが立体観測よりも遅れている。

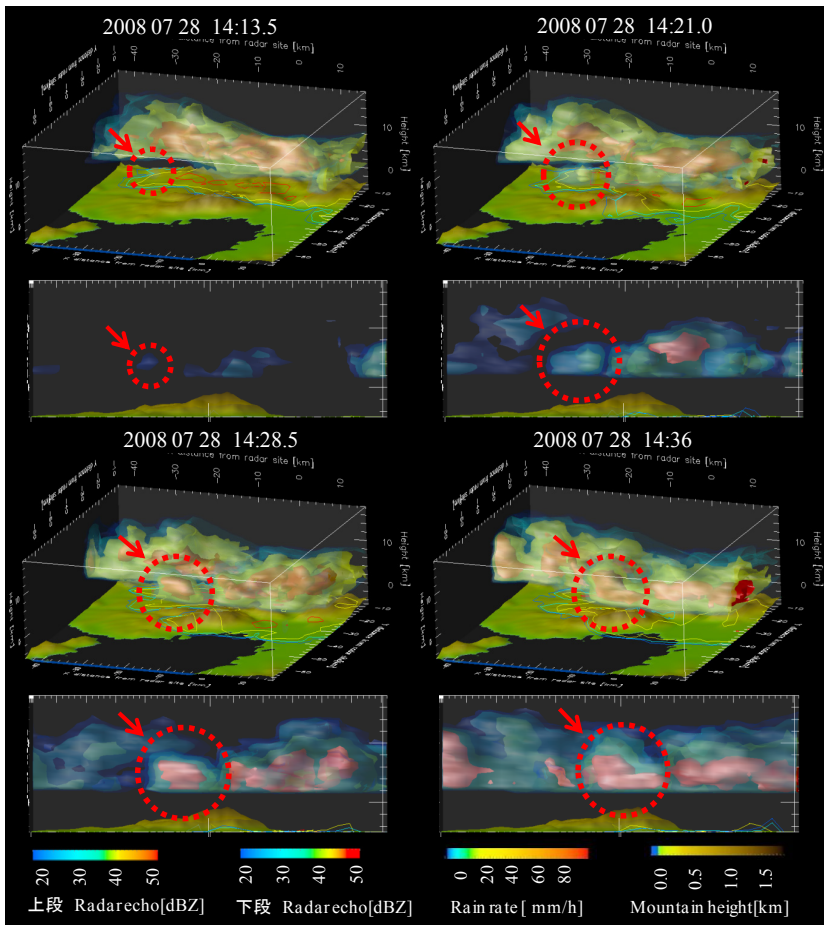


図-5 都賀川豪雨時の深山レーダー立体観測画像。時刻毎に上段は南東から北西方向を見たもの、下段は南から北方向を見たもの。

低仰角観測が図-2中に示した発達過程の③から④のの状態から捉えているのに対して、立体観測は②の状態を捉えている。数分でも早い探知が求められるゲリラ豪雨災害における「立体観測」の重要性と有効性を示している。したがって、「高感度、高時間分解能の X バンドレーダー」による「立体観測」を行うことでより早期に積乱雲を探知できると考えられる。

(4) 支援情報としての立体観測

深山レーダーによる立体観測が最も早期に積乱雲を探知していたことから、以下ではこのレーダー情報を用いて都賀川豪雨を警報発令に至るまでのプロセスを検討する。14時13.5分、14時21分のレーダー画像により、卵が探知され、それが発達しながら都賀川流域に近づいていることがわかる。情報伝達の所要時間10分を考慮すると、14時31分には都賀川流域に降水域が向かってきていることが14時21分のレーダー画像で確認され、この降水域は注意すべきであることが認識される。早期に防災機関が危険性を認識することは警報発令の準備のためにも重要である。14時28.5分のレーダー画像が14時38.5分に配信される時点では強雨域が現れ、流域に危険が迫っていることが確認でき、この時点で警報発令

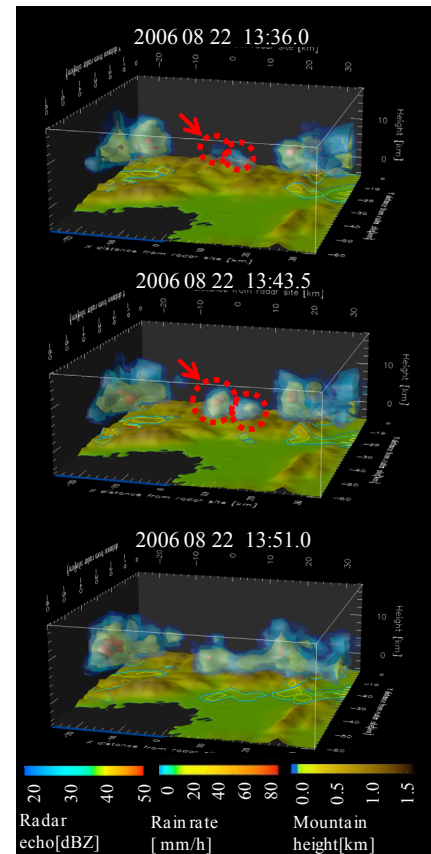


図-6 豊中豪雨時の深山レーダー立体観測画像。南東から北西方向を見たもの。

が行われれば、出水の14時42分までに3.5分の猶予ができる。たかが5分弱の時間ではあるが、ゲリラ豪雨による災害においては5分、10分といった短い時間が重要であり、命を守る5分、10分である。

しかし、立体観測で観測された範囲内のすべての卵をチェックし、発達するかどうかを監視することは現実には難しい。そのため、防災機関等は監視対象領域周辺で卵が発生したかどうか、発生した卵が発達しているかどうかをチェックするといった領域を狭めた危険察知をすることで、現時点でも利用可能な災害対策支援情報としての役割を立体観測画像は果たせるものとする。

4. 結論

近年、防災気象情報の高度化に向けて、国土交通省では首都圏・中部圏・関西圏において偏波ドップラーXバンドレーダーネットワークの導入が進められており、一方、気象庁ではGPS可降水量の気象モデルへの同化が行われている。前者は、最新型の偏波観測機能を導入することで降雨減衰の影響を受けない観測パラメータを降雨量推定に利用可能な段階にきており、複数のレーダー

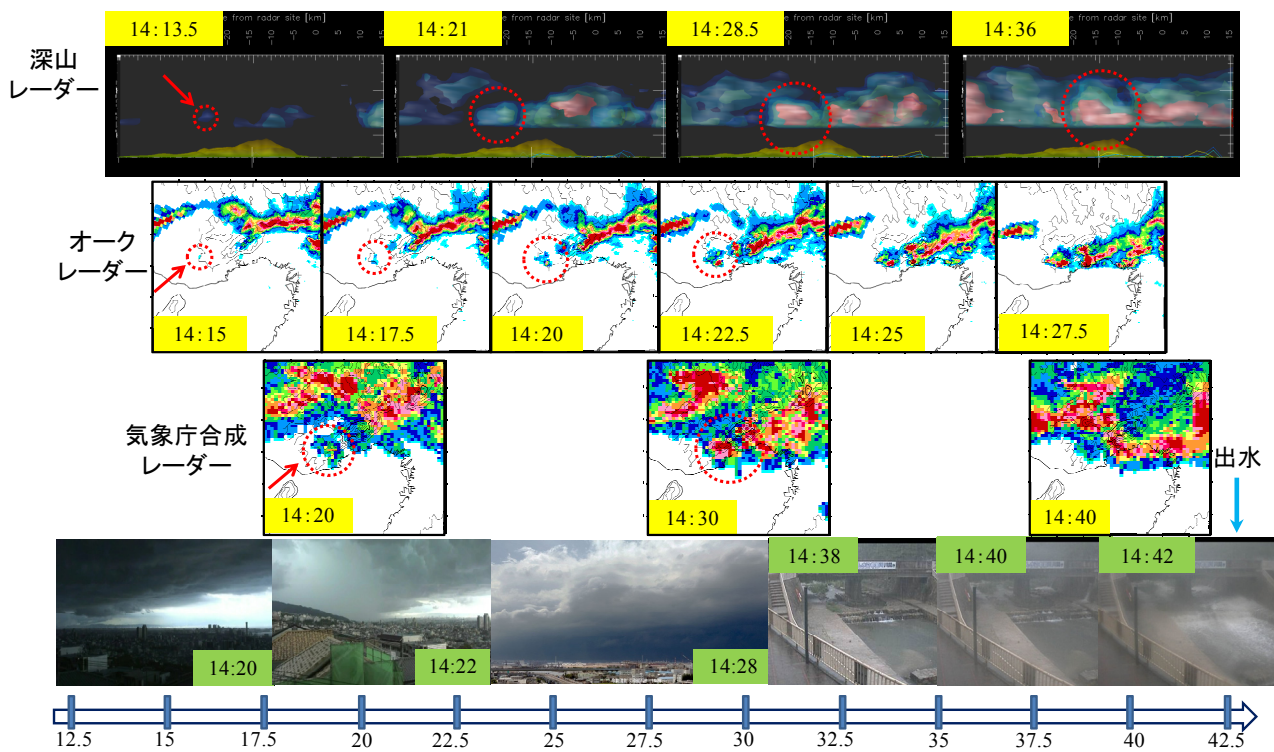


図-7 都賀川豪雨時のレーダー画像、および都賀川上空と出水状況の写真を示す。

最下段の矢印および数字は14時12.5分から14時42.5分までの時系列であることを表している。

によって相互補完することでさらに降雨減衰の問題等を軽減できる。これは本論文が示した、ゲリラ豪雨対策には高時間分解能の立体観測が有効であり、降雨減衰の問題さえなければ高空間分解能で監視できる X バンドレーダーによる観測が最適であることと合致する計画である。情報配信時間も 2 分以下に短縮するように計画されているため、よりピンポイントの正確な降水量の観測が可能になるとともに、より早期に卵を探知できるものと期待できる。また後者については、降水形成の源となる水蒸気量を気象モデルに取り込むために、気象庁では高頻度に観測される GPS 可降水量をデータ同化することで気象モデルの降水予報精度改善に取り組んでいる⁸⁾。

両者を含めた局地的な降水予測への取り組みにより将来的な精度の向上が期待されるが、現業の設備や技術を用いてゲリラ豪雨を予測するためには、まず豪雨となる卵の探知能力を上げることが第一歩である。卵を早期に探知することで積乱雲の発達、移動という挙動に対する予測への有効な情報となり得る。今後は積乱雲の発生も含めた 5 分、10 分の予測手法に取り組む必要があるが、予測手法が実現する前の段階であっても、今回示したような立体観測画像を防災機関等にリアルタイムで配信し、災害対策支援情報として利用することにより人間の目視による早期の危険予測が可能である。

謝辞：本論文中の国土交通省深山レーダーの観測情報は近畿地

方整備局淀川ダム統管理事務所から、大阪市オークレーダーの観測情報は建設局下水道河川部から研究用として提供頂いた。オークレーダー観測情報の読み取りには(株)日水コンの柴田研様に多大な労力を頂いた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省：中小河川における水難事故防止策検討WG報告書，2009。
- 2) 白石栄一：局地的な降雨観測・予測技術の動向，科学技術動向，文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター，第95号，pp.34-45，2009。
- 3) William R. Cotton and Richard A. Anthes.: Storm and cloud dynamics / 883pp, 1991.
- 4) 浅井富雄：集中豪雨のメカニズムと予測に関する研究，458pp, 1990。
- 5) 高橋劭：雲の物理—雲粒形成から雲運動まで—，東京堂出版，172pp, 1987。
- 6) 中北英一，椎葉充晴，池淵周一，高棹琢馬：三次元レーダー雨量計情報の可視化，土木学会論文集，第393号/II-9，pp.161-169，1988。
- 7) 中北英一，矢神卓也，池淵周一：1998那須集中豪雨の生起・伝播特性，土木学会水工学論文集，第44巻，pp.109-114，2000。
- 8) 露木義，川畑拓矢：気象学におけるデータ同化，気象研究ノート第217号，2008。

(2009. 9. 30受付)