

XバンドMPレーダーを用いたゲリラ豪雨の早期探知と追跡

中北英一・山邊洋之*・山口弘誠**

* 京都大学大学院工学研究科

** 京都大学生存基盤科学研究ユニット

要 旨

2008年7月28日都賀川での出水に代表される短時間のうちに急激に発達する積乱雲がもたらす局所的な集中豪雨(ゲリラ豪雨)が気候変動や都市部におけるヒートアイランド現象等と絡めて議論され、その発生頻度の増加が危惧されている。そこで国土交通省は、より早期の降雨の探知や予測、より精度の高い降水量推定を目指し、最新型偏波ドップラーレーダー網を整備し2010年7月より現業用運用を開始した。本研究では、最新型Xバンドレーダー網による高密度、高時間分解能のデータを用いて3次的に発達する積乱雲の特性、発達挙動に関する事例解析を行った結果、気象レーダーによる上空監視がより早期にゲリラ豪雨のタマゴを捉えていることを明らかにした。また、降水セルの検出と積乱雲の特性(体積等)を考慮することで発達する積乱雲を3次的に追跡する手法を開発した。加えて、この手法を用いて局所的な集中豪雨事例を複数例抽出し、積乱雲が地表に強い強度の降水をもたらす危険性を判断する指標の解析を行った。

キーワード: ゲリラ豪雨, 最新型偏波Xバンドレーダー, 追跡, 危険性予測

1. はじめに

昨今、豪雨の発生頻度について温暖化、都市化と絡めて議論されるようになってきおり、近年発生した豪雨のなかでも2008年に頻繁化した局所的集中豪雨(局所的大雨)と呼ばれるスケールの豪雨は、これまでに例のない災害をもたらす社会に多大なインパクトを与えた。いわゆる「ゲリラ豪雨」である。突然発生し、急激に発達した積乱雲による降水が小流域での出水を引き起こし、その激流により人命が失われる災害が相次いで発生した。河川を管理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、ゲリラ豪雨による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この災害の特徴である。現在、地球規模で起きている気候変動や都市部におけるヒートアイランド現象などが要因となりゲリラ豪雨はこれからも発生する可能性がある。このゲリラ豪雨に対するきめ細かな防災情報の提供等の早急な対策が求められており、この豪雨の予測を可能にすることは水害による事故の防止及び軽減のため、また人々が安心して暮らせる社会のためにも大変重要かつ緊急な課題であると言える。

2. ゲリラ豪雨と最新型Xバンド偏波レーダー

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ものがFig. 1である(白石, 2009)。発生から30分程度で豪雨をもたらす様子が示されている。

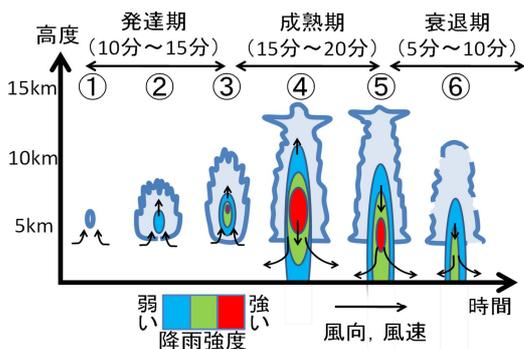


Fig. 1 The growth process of the cumulonimbus causing a local downpour.

2.1 ゲリラ豪雨を受けての対策

正確な降雨予測，降水量推定に関しては観測技術において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。近年の観測史上の記録を上回る局地的大雨や集中豪雨等による洪水災害の多発により，河川管理者に更なる迅速かつ的確な対応が求められている状況を踏まえ，国土交通省は2010年7月より最新型Xバンド偏波レーダー運用を開始した。積乱雲のスケールは数kmであり，従来のCバンドレーダーの空間分解能(1.5km)では積乱雲の発生から発達消滅までの挙動を詳細に再現できず，また，レーダーの空間分解能が一つ一つの雲をとらえられるほど細くないため局所的な状況を把握するのが難しいといった問題点があり，それを補うべく観測範囲は狭いが空間分解能が高いXバンド(3cm)波長のレーダーが導入された。最新型偏波レーダーでは，Xバンドレーダーの問題点とされた，降雨減衰を改善することができ，また複数台のレーダーで都市部を観測することにより，空間的に大変密な観測を実現している。

このように降雨監視体制が強化され，高頻度，高解像度の降雨観測情報を得られることで時々刻々と変化する降水域の動きを上空も含めて把握できるようになってきたが，これらのレーダーを有効的に活用することにより局所的な集中豪雨の予測に役立てるにあたり，高空間分解能を有効に生かすためのレーダー運用面に検討の余地は残されている。

2.2 本研究で用いるレーダー

最新型Xバンド偏波レーダーが関東，中部，近畿，北陸に整備され，今後，東北，中国，九州にも導入される予定である。近畿には4台のXバンド偏波レーダー（田口，六甲，葛城，鷺尾山）が導入され，ネットワークを形成しており，本研究ではこれらのレーダー情報を用いる。「偏波」の名が示すようにこ

これらのレーダーは，従来のコンベンショナルレーダーで観測されていた，レーダー反射因子，ドップラー速度だけでなく，伝搬位相変化率等の偏波パラメーターを得ることができる。また仰角を変化させながら降雨を観測できる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持つ。現業の観測では1分間のうち3仰角を観測し，そのなかで地方合成に用いるため固定仰角観測を1仰角，残り2仰角で3次元観測，を行っている。現在は低仰角を密に観測する仰角となっており，データ合成には1分ごとの低仰角観測2仰角を用いて移動平均をとることで1分間隔の地域合成データが配信されている。固定仰角観測では半径40kmの定量観測範囲と半径80kmの定性観測範囲で観測している。

3. ゲリラ豪雨のタマゴの早期探知

ゲリラ豪雨災害軽減のためには豪雨の起源を探ることが重要である。本章では，レーダーで捉えだされてから豪雨をもたらすまでの降水域の挙動を可視化することで，ゲリラ豪雨の生成過程から地表面に豪雨をもたらすまでの挙動を解析する。そして，観測方法の違いによるゲリラ豪雨のタマゴの探知時刻を比較することでより早期に豪雨の発生を捉える手法について考察する。Fig. 2にゲリラ豪雨のタマゴの概念図を示す。レーダー監視時刻を t ，観測時間分解能を Δt とすると，時刻 $t - \Delta t$ ではレーダーでは捉えられていない降水域が時刻 t で突如として現れる。これを本研究では「ゲリラ豪雨のタマゴ」，または「タマゴ」と呼ぶ。タマゴはレーダー観測範囲に多数存在しており，一部のタマゴが急激に発達しゲリラ豪雨をもたらす。

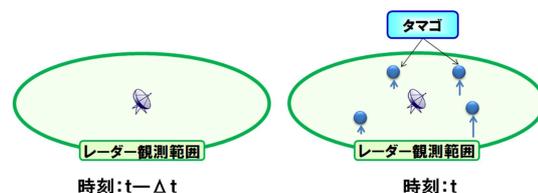


Fig. 2 The radar detects the time and location of initial echo developments (so-called baby rain cell or first echo) and the complete life history of individual rain cell. There may be some dangerous and noticeable baby rain cells which are possible to cause heavy rainfall.

3.1 レーダーデータの処理

レーダーの3次元観測は数分を要するため、レーダーの仰角ごとに観測時刻が異なっている。そのため、データを丸める際にボリュームスキャンの中間時刻とするのが一般的である。しかし、本研究では防災に視点を置いており、現実の観測においてボリュームスキャンの中間時刻では、走査が完了していない。そのため、本研究ではリアルタイムでの情報配信を意識し、データがすべて観測された時刻を出力時刻としている。すなわち、立体観測が1サイクル終了する時刻にすべての仰角の観測がなされ、その時刻での反射強度や偏波情報およびドップラー速度の空間分布の観測値が瞬時に得られるものと見なして、レーダー情報を使用した。また、用いるデータは低仰角から順次仰角を上げるようなデータセットとして、固定低仰角、立体観測データを選択した。これによりビームの走査時間による降水域の移動や傾き等を把握できる。これを水平方向0.5km×0.5km、鉛直方向0.25kmの格子点データにXバンドレーダーの距離方向の分解能が0.15kmであることに注意し内挿した。より具体的なイメージを得るために、地形情報の3次元表示も同時に行った。その際、標高データはShuttle Radar Topography MissionによるSRTM-3を用いた。解析領域は田口を中心とし、水平方向160km×160kmとする。解析期間は国交省がXバンド偏波レーダーの運用を報道発表した7月5日から8月31日までの期間とする。

3.2 探知時刻比較

低仰角で高頻度に観測されたデータとそれよりも時間分解能が荒い立体観測のデータを用いてゲリラ豪雨のタマゴの探知時刻の比較を行う。

対象期間である7月5日から8月31日までの中で、作成した3次元図、およびCバンドレーダーによる観測データを用いて、突然発生し急激な発達をする降水域(ゲリラ豪雨)を目視により22事例抽出した。抽出基準としては、ゲリラ豪雨災害を意識して、周辺に降水域が存在せず、突如として発生・発達する降水域を抽出した。また、その抽出した降水域に対して、[1]低仰角観測の地域合成データG000(低仰角観測、時間分解能1分)、[2]今回作成した3次元図(立体観測、時間分解能5分)、とでゲリラ豪雨のタマゴの探知時刻を比較した。3次元図にはXバンドの感度の良さを利用した5dBZ以上の降水域(5, 20, 30, 40を等値面で描く、以下5dBZ図)と、強降雨強度領域を描く20dBZ以上の降水域(20, 30, 40, 50を等値面で描く、以下20dBZ図)との二種類を利用する。探知時刻の基準については地域合成データは0.1mm以上の降水域、3次元図に関しては5dBZ以上の図からタマゴの探知

を行い、5dBZ図で判断できない場合は20dBZ図を用いて立体観測の探知時刻とした。また、グランドクラッターとの区別が難しい場合や、タマゴが発生後にすぐには発達せずにくすぶる場合は、この降水域が明確な発達挙動を示した5分前をタマゴとした。Fig. 3, Fig. 4に、抽出した2010年8月14日のゲリラ豪雨事例を立体観測図(20dBZ図)を用いて示す。それぞれの図の中心は田口レーダーサイトであり、z軸は高度、x軸、y軸には田口レーダーサイトからのそれぞれ東方向、北方向への距離が記されている。また、Fig. 5に同事例の地域合成データG000を用いて示す。これらの図から六甲山周辺で12時20分に発生した降雨域が20分程度で成長し、豪雨をもたらした様子がわかる。

3.3 探知時刻比較結果

Fig. 6に今回抽出した事例の発生個所および発生日を、また探知結果をTable 1に示す。Table 1にはゲリラ豪雨発生日時、5dBZ立体観測、20dBZ立体観測、地域合成データG000によるゲリラ豪雨のタマゴの探知時刻を示している。探知時間差(立体観測の探知時刻から地域合成データの探知時刻を引いたもの)が示すように20個のサンプルの平均で約2.8分立体観測が早期にゲリラ豪雨のタマゴを探知していることがわかる。5分にも満たない時間であるが、この短い時間がゲリラ豪雨災害軽減のリードタイムの確保につながるため、決して軽視できない時間である。

3.4 ゲリラ豪雨のタマゴの早期探知についての考察

時間分解能の高い低仰角観測と時間分解能の粗い立体観測によるゲリラ豪雨のタマゴの早期探知時刻の比較を行った結果、立体観測がより早期にゲリラ豪雨のタマゴを探知していた。1分間隔の低仰角観測よりも5分間隔の立体観測が早期に探知した理由としてゲリラ豪雨のタマゴが低仰角観測の範囲を超えた高度に出現したことが挙げられる。レーダービームが上空を通過しているため、早期に捉える事ができている。このように上空の監視を実施しなければ、上空に降水粒子が積乱雲内の上昇流に支えられて段々と蓄積されていき、十分量溜まったところで降水粒子が落ちてくるといふ挙動をつかむことができない。すなわち、上空に蓄積された降水粒子が落下し始めた後にはじめて低仰角のレーダービームで強降水域を捉えたとしても、ほぼ同時刻に地上で豪雨をもたらされることとなり、5分でも早く危険を探知するためにはレーダーによる立体観測が極めて重要かつ有効であることを示した。

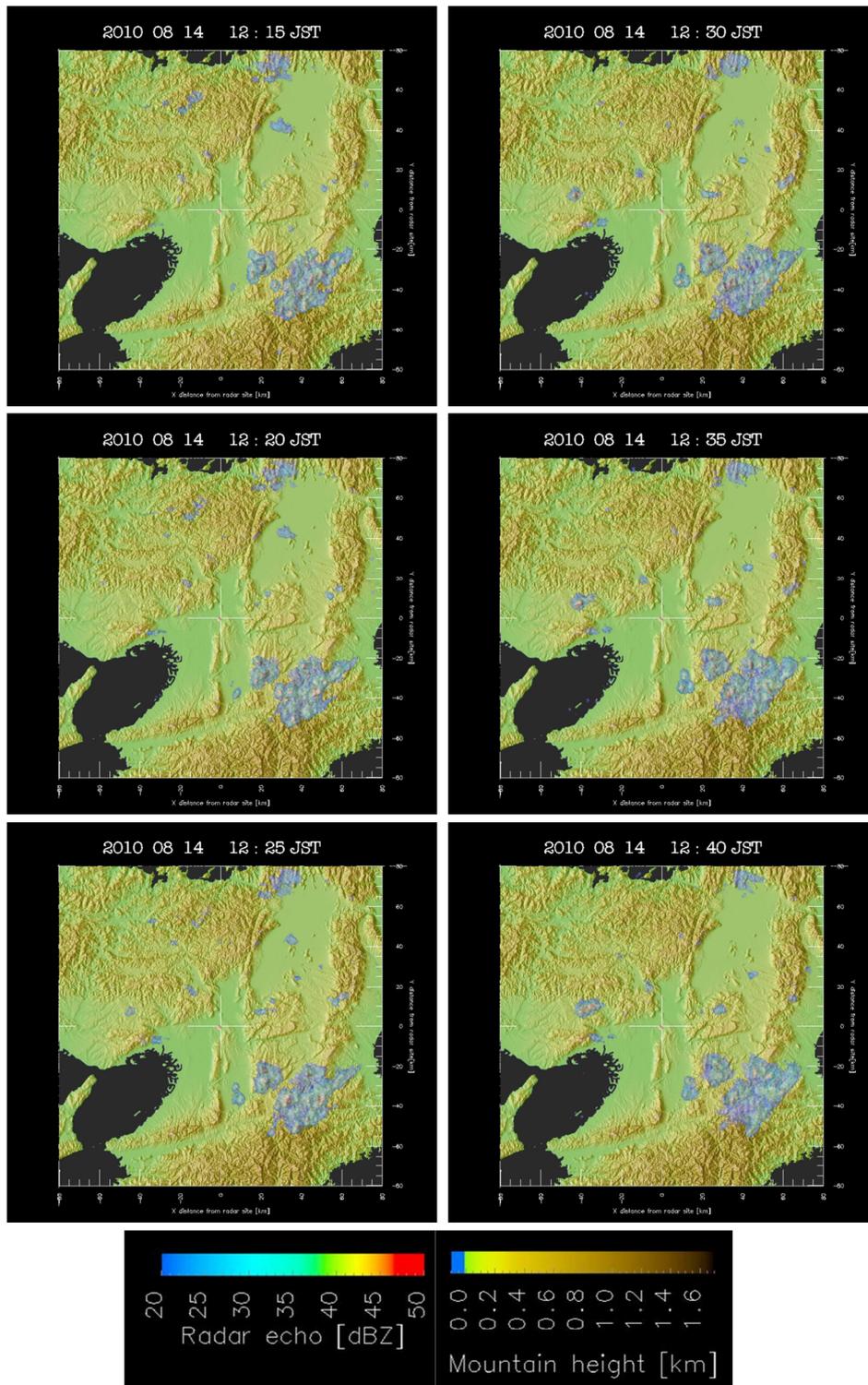


Fig. 3 3D images of radar echo observed from volume scan mode of the X-band radar network operated by the MLIT (Aug 14th ,2010). Time interval of observation is five minutes.

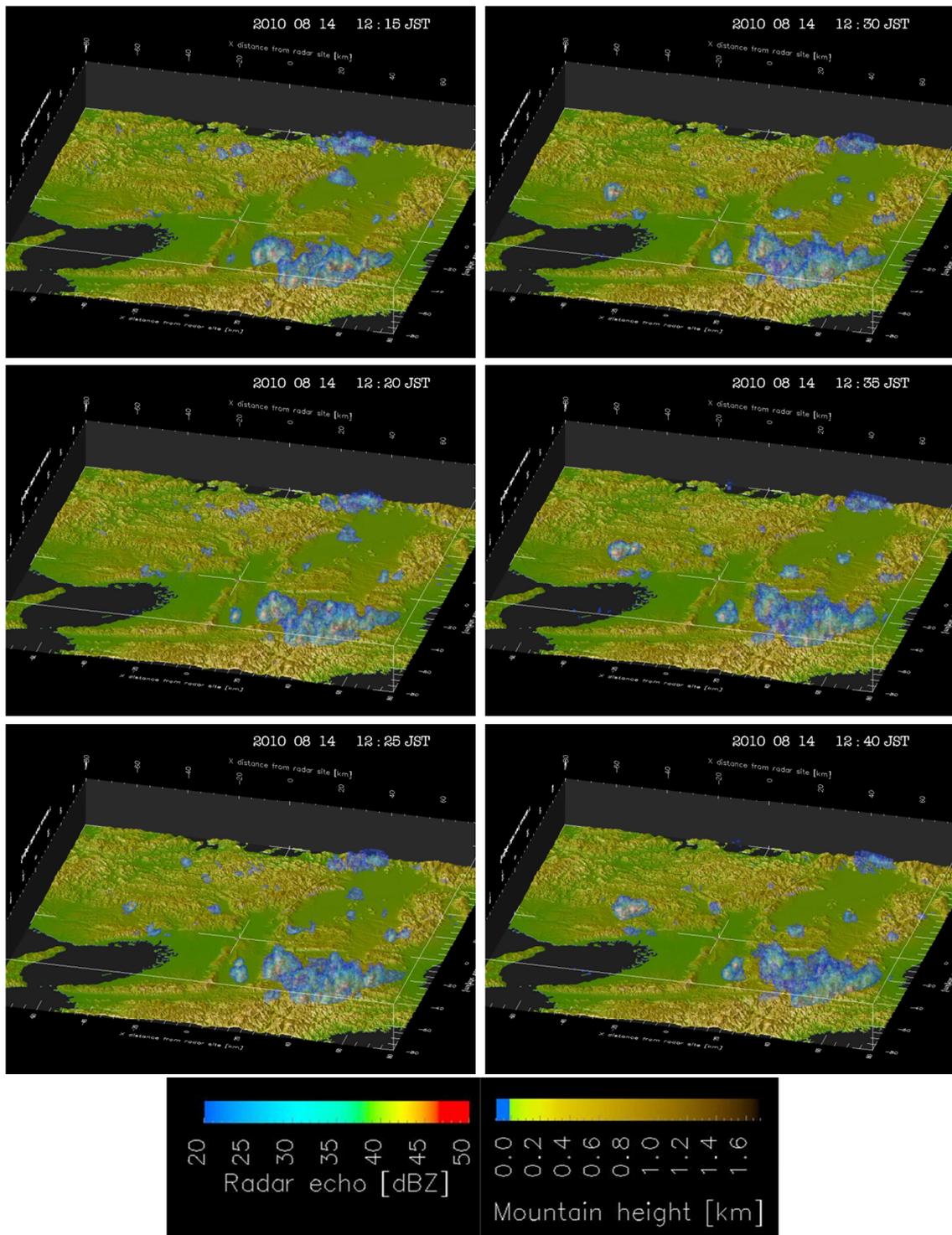


Fig. 4 3D images of radar echo observed from volume scan mode of the X-band radar network operated by the MLIT (Aug 14th ,2010). Time interval of observation is five minutes.

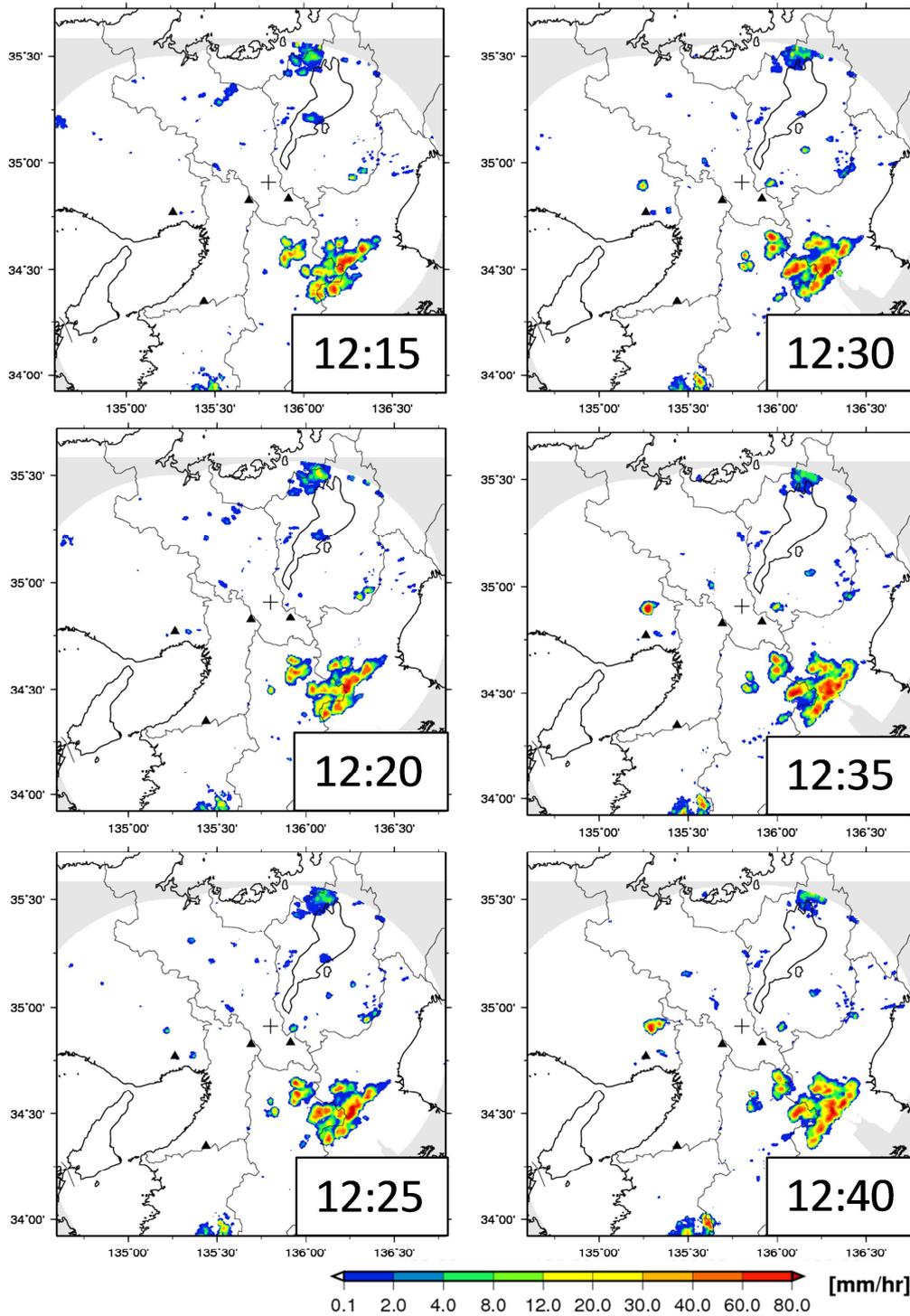


Fig. 5 Rainfall distributions in the Kinki area observed from low elevation scan mode of the X-band radar network operated by the MLIT (Aug 14th ,2010).

Table 1 The results of early detection of baby rain-cells from volume scan to low elevation scan.

| day | 3D(5dBZ) | 3D(20dBZ) | G000 | 探知時間差 |
|-------|----------|-----------|------|-------------|
| 7月7日 | 1230 | 1235 | 1234 | 4 |
| | 1235 | 1245 | 1237 | 2 |
| | 1305 | 1310 | 1311 | 6 |
| 7月16日 | 1615 | 1620 | 1627 | 12 |
| 7月17日 | 1550 | 1555 | 1558 | 8 |
| 7月24日 | 1650 | 1650 | 1653 | 3 |
| 7月25日 | 1525 | 1530 | 1531 | 6 |
| 8月6日 | 1540 | 1545 | 1544 | 4 |
| 8月14日 | 1220 | 1220 | 1223 | 3 |
| | 1240 | 1240 | 1235 | -5 |
| 8月20日 | 1700 | 1700 | 1657 | -3 |
| | 1750 | 1755 | 1755 | 5 |
| | 1830 | 1830 | 1828 | -2 |
| 8月24日 | 1530 | 1535 | 1532 | 2 |
| | 1605 | 1610 | 1612 | 7 |
| | 1630 | 1635 | 1631 | 1 |
| | 1655 | 1655 | 1659 | 4 |
| | 1900 | 1905 | 1905 | 5 |
| 8月25日 | × | 1650 | 1650 | 0 |
| | 1710 | 1715 | 1711 | 1 |
| 8月26日 | × | 1925 | 1924 | -1 |
| 8月27日 | 1450 | 1450 | 1450 | 0 |
| | 早期探知時間 | | | 2.818181818 |

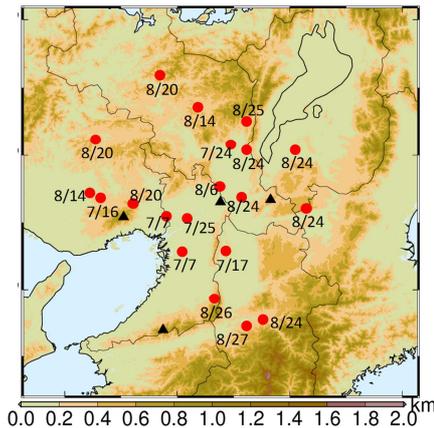


Fig. 6 The results of selection of the rainfalls. The shaded color indicates DEM. The red circle indicate generation point of baby rain-cells.

4. ゲリラ豪雨の追跡モデル

本章では、まず、超短時間降水予測手法のための課題を述べ、3章で培ったレーダー画像の3次元的な移動を捉えた経験から、3次元的な降水域追跡モデルの開発を行う。加えて、そのモデルを適用した結果追跡された降水域の体積や内部挙動といった特性の解析を行う。この降水域追跡と解析を並行して進める手法が、短時間予測手法よりもさらに短い時間を

予測する超短時間降水予測手法確立への土台となるものである。

4.1 超短時間降水予測の課題

レーダーによる観測が広域で瞬時的に行われるという特徴を生かし、降水域の移動パターンを推定し、外挿することで降雨の予測を行う運動学的手法が短時間予測手法の中心となっている。しかし、平野部における層状性降水に対する精度は良いが、対流性や地形性の卓越した降水システムに対する精度は低いことが知られていたため、様々な手法による改善が行われている。

運動学的手法の適用範囲が限定的なものに留まる原因として、降水システムに関する力学や物理を考慮できないことが挙げられる。レーダー反射因子は、降水という気象現象の結果であり、気圧や気温等の気象現象の内部状態を記述する物理量とは異なる。これら物理量の変動がレーダーによって観測される瞬時的に反映されるわけではないため、降水の発達衰弱の予測は困難な問題とされる。よって従来の方では、時間変化が大きい降水挙動に対応できず、特にゲリラ豪雨のような大きな変化がもたらされる場合の予測精度は低くなる。

また、多くの運動学的な予測モデルはレーダーによる3次元空間中のある低仰角を切り取った情報(2次元)を元にしており、上空に降水が存在する場合の情報は得られない。そのため、超短時間降水予測の精度向上には、降水挙動の3次元的な挙動を考慮することで精度向上を図る必要がある。

4.2 降水域追跡の意義

ゲリラ豪雨を対象とした監視および予測技術を開発するためには、顕著事例の解析のみならず、その前後に発生した複数の積乱雲の統計的な情報を持ち合わせる必要がある。災害が起これなければ、見逃されてしまう積乱雲も多い。これらの積乱雲を抽出し、積乱雲の寿命や体積、発生箇所、個数を判別することで、ある日のゲリラ豪雨の起こりやすさや、より長期ではゲリラ豪雨の発生しやすい危険な地点までも判断が可能となり、河川管理等に役立てることができる。レーダーを用いて統計的に降水セルの特徴を示す研究も行われており(例えば、Zipser and Lutz (1994), Sauvageot et al. (1999), Shusse and Tsuboki(2006))降水セルの特性として、発生場所、降雨強度、面積、形状、エコトプ、降水効率等が挙げられている。これらの研究の多くは、低仰角観測によるレーダー情報を用いた目視による抽出が主であり、時間、労力、専門性を必要とした。本研究では3次元データにより降水域の特性として体積や

鉛直挙動等の降水域内部の解析が可能となった。また、計算機による抽出が超短時間予測手法の基礎となり、意識していなかったときに突然襲ってくるゲリラ豪雨による災害を防ぐシステムにつながると考える。

4.3 降水域追跡手法

降水域追跡の手順は、1.降水域の検出、2.降水域の追跡である。以下にその具体的な方法を示す。

(1) 降水域の検出

3次元反射強度データ(水平分解能:0.5km, 鉛直分解能: 0.25 km, 時間分解能: 5分) を用いて、降水域を「20 dBZ 以上の反射強度で0.5km³以上の体積をもつ閉曲面」と定義し、3次的に検出する。個別の降水域を毎時間ごとにそれぞれ識別する必要があり、本研究では、検出手法としてとして(深町,2010)を参考に画像解析の手法であるConnected Component Labeling(以下, CCLとする) を3次元に拡張したものをを用いる。この検出によって3次的に1つ1つの降水域を認識する番号を付けることができる。CCLにより得られた連結成分を1つの降水域と定義する。

(2) 降水域追跡のための類似指標

降水域を追跡するためには時刻 $t - \Delta t$ と時刻 t での降水域について、それぞれの降水域との関係を決せねばならない。具体的には「1対1」、「合併」、「分離」、「消滅」、「発生」等を決定する必要があり、それらを決定する指標をここでは類似指標と呼ぶことにする。類似指標には「面積重複割合」、「降水域の移動距離」、「降水域の移動方向」、「面積、体積の相関」等があり、これらを複合的に用いることで追跡をおこなうことができる。

本モデルは、発生したタマゴから急激な発達をする降水域を追跡することが目的であり、「発生」、「発達」が重要となる。以下に、類似指標の検討を示す。

[1] 面積(体積)重複割合: 時刻 $t - \Delta t$ と時刻 t での降水域のかぶり(overlap)を評価する。かぶりが大きいものほど類似性が高い。

[2] 降水域の移動距離: 降水域の移動スピードは最大で60km/hour程度とされており、この速度から求める影響半径を用いて時刻 $t - \Delta t$ と時刻 t で降水域の移動距離を評価する。移動距離が短いもの、または周辺降水域の移動スピードとマッチするものほど類似性が高い。

[3] 降水域の移動方向: 移動距離を算定するのと同様その方向のずれを評価する。また、周辺の降水域の移動ベクトルとの類似性を評価する。

[4] 面積(体積)差: 時刻 $t - \Delta t$ の降水域と時刻 t の降水域で面積(体積)を評価する。面積(体積)の差

が小さいものほど類似性が高い。

例えば、Dixon and Wiener(1993)は時刻 $t - \Delta t$ での降水域 i と時刻 t での降水域 j の降水域の移動距離

D_{ij} , 面積(体積)差 A_{ij} を用いて、類似指標 J_{ij} を

$$J_{ij} = w_1 A_{ij} + w_2 D_{ij} \quad (1)$$

とし、の総和を最小とする降水域の組み合わせを選択することで追跡を行っている。ここではそれぞれの類似指標の重みである。本研究では、類似指標として「移動距離」を用いた。すなわち式(1)の評価関数において、「移動距離」のみを考慮する。その根拠として、「面積重複割合」は移動が速い場合や小さな降水域に対しては適応が難しく、「降水域の移動方向」は初期の発達段階では移動方向が不安定な降水域が多く存在しており、「面積、体積の相関」はゲリラ豪雨では当てはまらないため、である。

また、Hand and Conway(1995)のように、積乱雲の発達をステージに分類し予測を行う手法が開発されている。本研究では発達過程を体積の変化で表現しながら追跡を行うこととし、ステージごとに発達する降水域の体積設定を行った。時刻 t での降水域 i の体積を V_{t_i} とし、設定したステージごとの体積の制限

の最小値を $V_{stageN_{min}}$, 最大値を $V_{stageN_{max}}$ とし、stage N はタマゴの発生をstage 1とする時間分解能5分ごと30分間の積乱雲の成長過程を示す。このよう時間ごとに体積による制限を行うことで、比較対象となる降水域を限定し、追跡精度の向上を図る。

Fig. 7に追跡のフローチャートを示す。以下に具体的な追跡の流れを示す。「→」は追跡されたことを示す記号とする。設定した条件としては、タマゴの発生高度の設定を2kmから10km間、影響半径は5kmとした。本研究では防災の視点を重視しゲリラ豪雨の定義の中で述べた突如発生し、急激な発達をする降水域によってもたらされる災害を防ぐという目的から、追跡時刻を発生から地表面での豪雨までの30分間(タマゴ探知時刻を5分)と設定した。

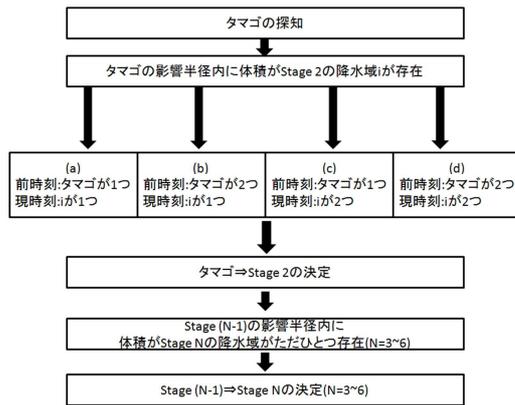


Fig. 7 Strategy of development of tracking system.

4.5 追跡された降水域とその特性

7月7日の事例を例にゲリラ豪雨をもたらす降水域の特性について述べる。Fig. 10は追跡された7月7日の降水域の鉛直断面図、Fig. 11は降水域の体積、雨水量、最大反射因子、下層の最大反射因子(2km以下)、最大反射因子の鉛直分布、雨水量の鉛直分布、断面積の鉛直分布である。鉛直断面図は、前の時刻の重心と現時刻の重心を結ぶ方向に横軸をとり現時刻の重心を x 軸の中心、+方向を降水域の進行方向とした。また、標高をグラフで描いている。偏波パラメーターを用いた雨水量推定式はMaki et al., (2005)を参考に、すべての高度で雨水量に変換し用いた。もちろん、融解層より高い高度では雨粒ではないが、積乱雲内の水分を示す統一的な指標として用いた。

Fig. 10では、約4km高度でタマゴが発生し、その後降水域全体の体積や雨水量が増加することがわかる。stage 3の段階では、内部に強降雨強度域が発生し、stage 4で地表面に向けて落下を始め、また新たな強降雨強度域も生成されている。stage 5では、先に発生した強降雨強度域が落下しており、stage 6で落下する。Fig. 11での断面積の鉛直分布では、stage 1からstage 3まで降水域上層の面積が増加するが、stage 4からstage 6では面積は全体的な増加を示すが下層へ増加量がシフトしていることが分かる。また、雨水の鉛直分布ではstage 1からstage 3まで降水域上層の雨水が増加するがstage 4で中層にシフトし始め、stage 5で新たに生成した強降雨強度域のため、ピークが2つとなり、stage 6で下層に落下していることが分かる。

以上のように、3次元データを用いることで、降水域の鉛直分布が詳細に判明し、降水域内部でのセルの発生挙動までも見てとれる。このように計算機によるゲリラ豪雨の追跡は、詳細な降水域の監視に役

立ち、またゲリラ豪雨発生の見逃しを軽減すると考えられる。

4.6 追跡モデルに関する考察

時々刻々と変化する複雑な降水挙動の中で、タマゴから発達する危険な降水域を3次的に計算機で追跡を行う手法を開発した。また、追跡を行うことで降水域それぞれの特性を示す指標が自動的に得られるため、スケールの小さな個別の降水域を監視する際の有効な情報となる。

しかし、追跡結果追跡を失敗した事例もあり、今後の精度の向上に努める必要がある。ゲリラ豪雨事例として抽出した22事例のうち14事例が追跡可能という結果であった。追跡できなかった理由として、[1] 周辺にタマゴと同じサイズの降水域またはグラウンドクラッターが存在していること、[2] 周辺の大きな降水域との合併が起ったこと、が挙げられる。これは、タマゴの発見から順に追跡する、体積制限を加える、降水域内部でのセル分割を行わない等が追跡失敗の原因であるが、最大の理由はタマゴの発見から順に追跡するという条件設定にあった。ある程度発達した降水域が単独で移動する場合は追跡が容易であると考えられるが、タマゴからという制限のため、最初のタマゴの認知しなければ、後々の追跡を行わなかったためである。また、目視でもタマゴからの追跡が難しい場合もあり、追跡精度向上のためには、追跡をタマゴの探知からではなくある程度発達した段階から開始しそのタマゴを逆推定することで追跡を行う手順が精度向上につながると考えられる。

また、今回降水域として定義した中には複数の降水セルが存在していることが確認でき、第2、第3のセルの生成がゲリラ豪雨災害を甚大にする。そのため、今回定義した降水域の中に降水セルというさらに細かい単位を考え、この降水域の内部でのセルまで追跡を行うことで、セルの組織化までより詳細な解析が可能となる。Xバンド偏波レーダーはそのようなセルの分割までも可能となる空間分解能を備えている。

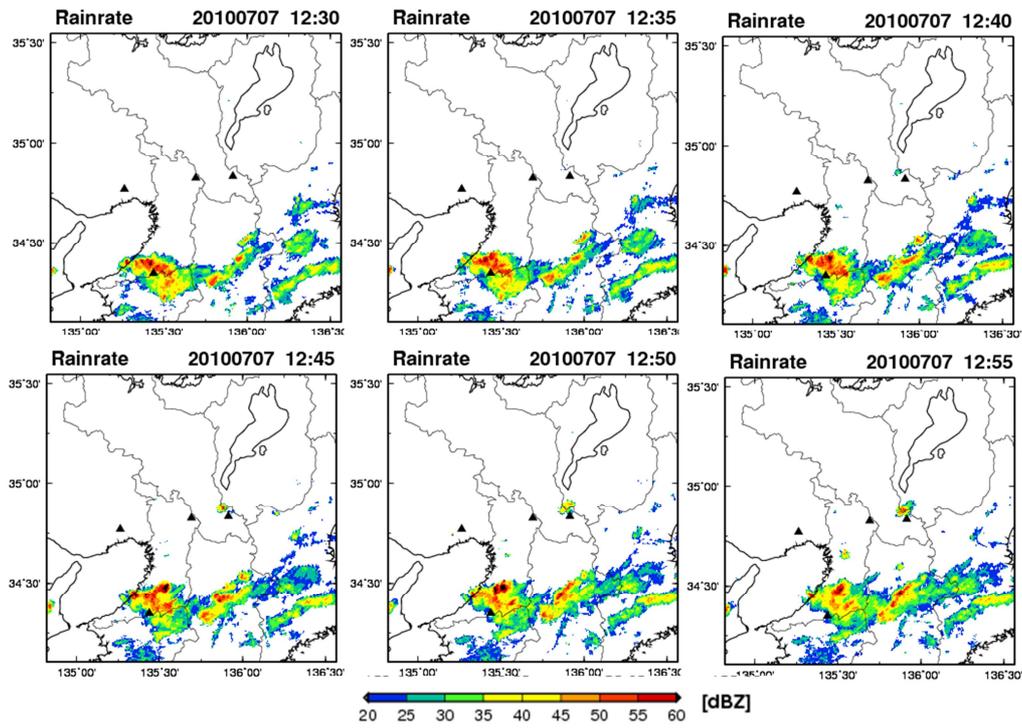


Fig. 8 Rainfall intensity observed by X-band radar network.

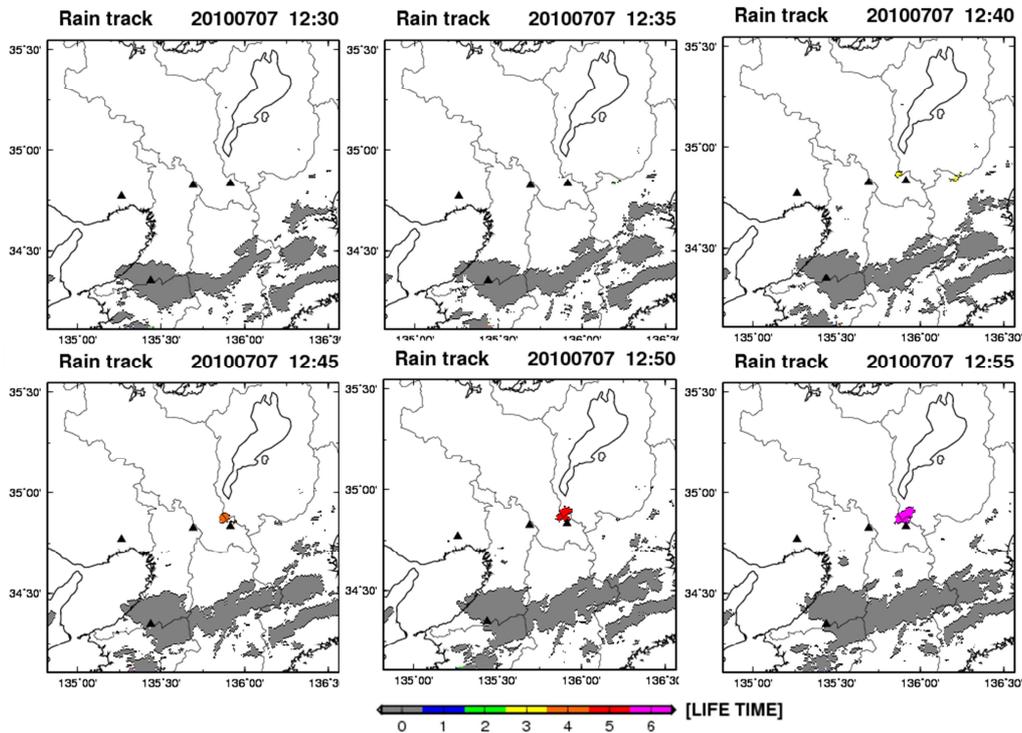


Fig. 9 The result of tracking model. The shaded color indicates life time about rainfall.

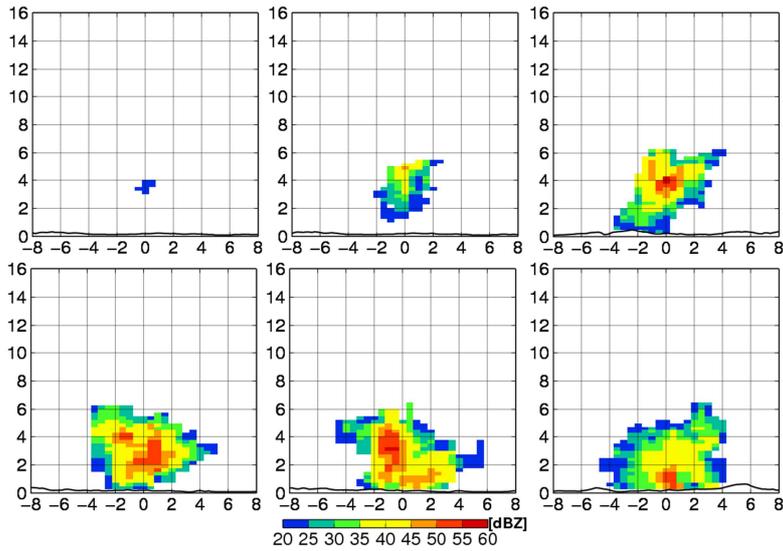


Fig. 10 Cross-section view of radar echo from baby rain-cell to mature cell.

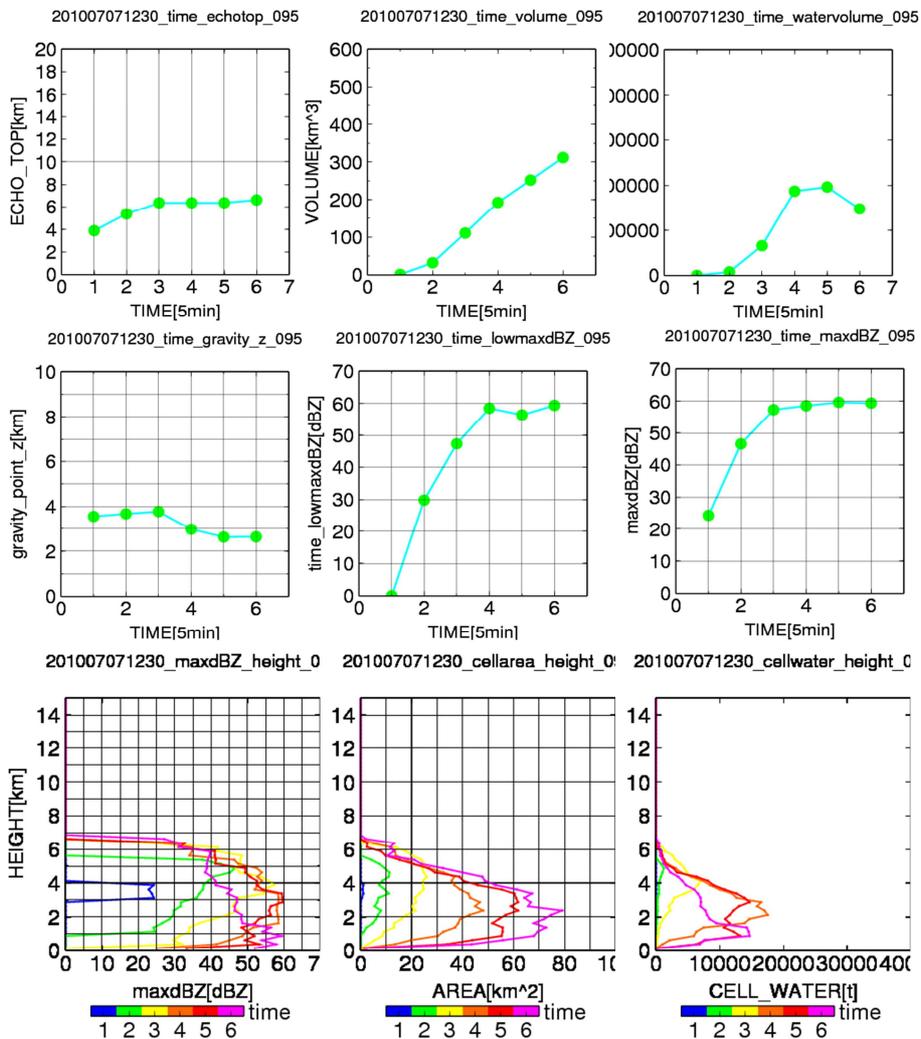


Fig. 11 Automatic cell tracking system provide many statistical information such as the echo top, the gravity point in the vertical direction, the volume of the cell, the profile of maximum radar echo, area, and the cloud water content.

5. ゲリラ豪雨の危険性予測

5.1 ゲリラ豪雨の危険指標について

ある地点で発生したゲリラ豪雨を時間的にさかのぼって考えると、地表での豪雨は上空で溜まった雨水の落下であり、また上空で蓄えられる雨水は発生したタマゴが発達することでもたらされる。本章では、この挙動を念頭に置き、ゲリラ豪雨がもたらされるよりも先に豪雨が発生することを定性的に予測するための危険性予測について考察する。具体的には、[1] 地表での豪雨よりも先に豪雨を探知すること、[2] 上空に降水粒子が益々溜まるよりさらに先にタマゴが発達するかどうかの判別を行うこと、を目標とする。

そこで、ゲリラ豪雨の発生や発達と関係する気象要因のなかで地表に豪雨がもたらされる前に検知できる指標を調査する。本研究ではそれら発生発達と関係のある指標を危険指標と呼び、レーダーで捉えられた降水域の立体構造とドップラー風速を用いて積乱雲内部での風速場を解析することにより、積乱雲の発達可能性を考え、危険指標としての有効性を検討する。

5.2 ゲリラ豪雨発生直前の探知

(1) 強降雨強度領域の早期探知

Table 2に追跡に成功したゲリラ豪雨事例14事例での強降雨強度域のセル内部での発生時刻と2km以下に強降雨強度域が存在した時刻を示す。これはFig. 11に示した、最大降雨強度および下層の最大降雨強度を用いて作成した。多くの降水域で強降雨強度域は2km以下よりも平均して約5分早期に強降雨強度域が探知されている。3章で述べたタマゴの早期探知だけでなく、豪雨となる直前の強降雨強度の領域も立体観測が早期に探知している。この情報は低仰角観測だけでは得られない情報であり、ここでも上空監視の重要性を示した。

(2) 雨量による豪雨の早期探知

雲底高度から雲頂高度まで積文した水分量である鉛直積算雨量VIL(Vertically integrated Liquid water)と豪雨の関係は指摘されており(例えば、Hirano and Maki(2010)), 短時間降水事例におけるVILの増加は、降水域内部での強降雨強度領域発生発達後、降水粒子が上昇気流では支えられずに一気に落下することで豪雨となるという挙動で理解ができる。すなわち、上空での雨量の増加がVILを増加させ、その増加が数分後の地上にもたらす降水の増加と対応しているのである。本研究では降水域の追跡によりVILという指標ではなく個別降水域の雨量を取り扱うことが可能となった。Fig. 12に今回追跡した2事例の雨量

の鉛直分布を示す。カラーバーは4章での追跡を行った積乱雲のstageと対応している。この図から約4kmよりも上空で徐々に蓄えられた雨水が最終的に落下し地表に豪雨をもたらす様子がわかる。雨量の議論の際にはブライトバンドによるピークの出現が考えられるが、雨量の鉛直分布だけでなく断面積の鉛直分布も同様に増加しており、鉛直断面図により明確なブライトバンドが存在していないことは確認している。すでに示した、Fig. 11の7月7日の降水域では新たなセルの発生とともにピークも明確に2つ現れたが、降水域のサイズが大きい場合、ピークは1つとなり、徐々に地表面に落下する挙動が示されている。これは降水セル内部での降水の落下挙動を把握し、数分後の地表面での豪雨を明確に示している。この5分、10分がゲリラ豪雨災害軽減に重要な時間であることを再度強調する。

Table 2 The results of early detection of high reflectivity from volume scan to low elevation scan.

| day | time | 立体観測 | 低仰角 | 強雨域早期探知 |
|-------|------|------|------|---------|
| 7月7日 | 1235 | 1240 | 1245 | 5 |
| 7月17日 | 1555 | 1615 | 1620 | 5 |
| 8月6日 | 1545 | 1555 | 1555 | 0 |
| 8月14日 | 1220 | 1225 | 1235 | 10 |
| | 1240 | 1250 | 1250 | 0 |
| 8月20日 | 1700 | 1720 | × | × |
| | 1755 | 1800 | 1805 | 5 |
| | 1830 | 1840 | 1845 | 5 |
| 8月24日 | 1535 | 1545 | 1550 | 5 |
| | 1610 | 1630 | 1635 | 5 |
| | 1655 | 1710 | 1715 | 5 |
| 8月27日 | 1450 | 1605 | 1605 | 0 |

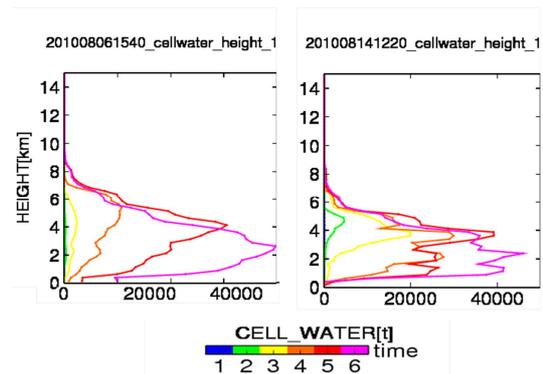


Fig. 12 The Vertical liquid water profile of the tracked cells.

(3) ドップラー風速による事例解析

ドップラーレーダーにより降水域での大気の流れに関する情報を得ることができる。この大気の流れは降水域の盛衰を支配する気象要因のひとつであり、積乱雲の内部ではFig. 1に示したような風速場が存在している。このドップラー風速を用いて、積乱雲の発達に関する収束域や内部の渦形成の様子等を把握する。まず、Fig. 13にタマゴ発生から発達せずに消滅する降水域のドップラー風速を示す。ドップラー風速がレーダーサイトから遠ざかる成分である暖色系色のみで占められており、

降水域の移動方向のみの成分のみとなっている。次にタマゴ発生から発達する降水域のドップラー風速をFig. 14に示す。発達するに伴い降水域内部で暖色系色と寒色系色が混在しているがわかる。これは降水域内部で風速が収束、渦を形成していることを示唆するものであり、今後、複数台のレーダー観測によるドップラー風速を用いることで3次元的な風速分布を求め、収散やシアといった定量的な指標を構築することで、降水域が発達するかどうかの指標としての利用できる可能性を示している。

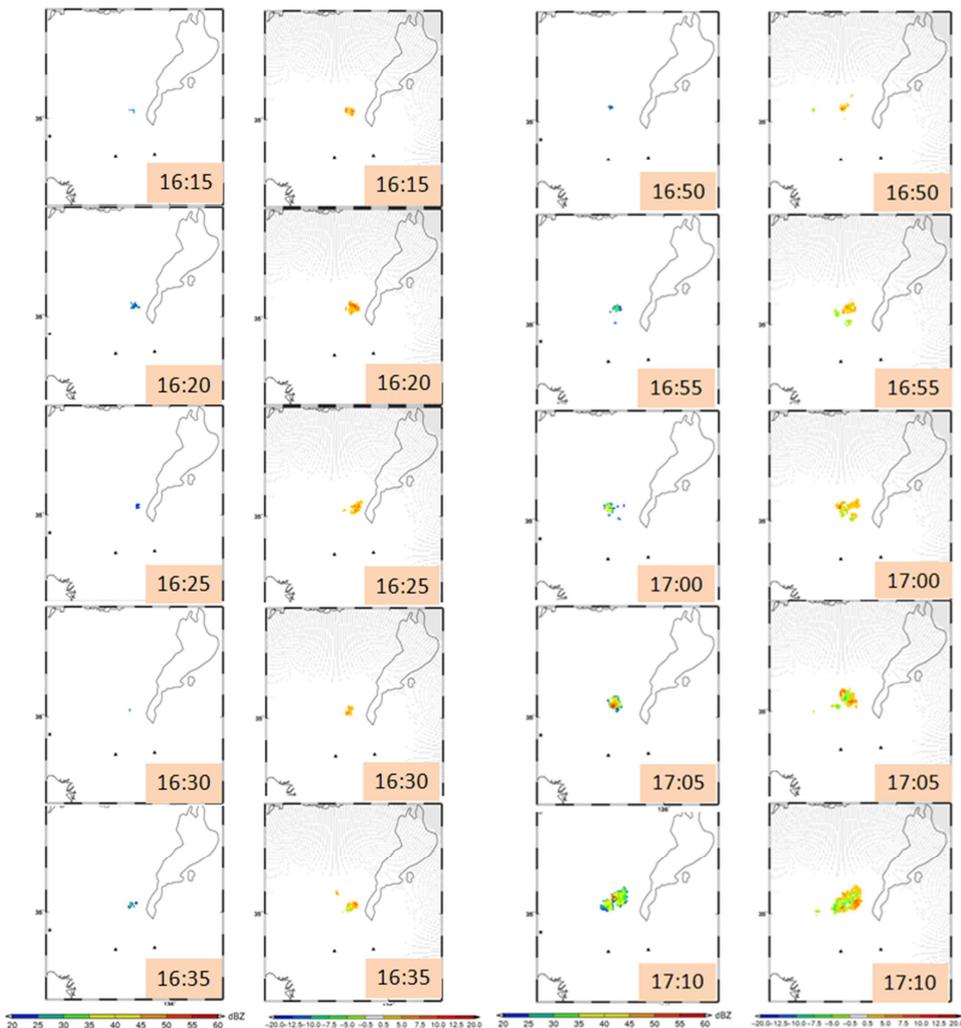


Fig. 13 Rainfall intensity and doppler velocity images from 16:50 pm to 17:10 pm. The baby rain cell does not grow up.

Fig. 14 Rainfall intensity and doppler velocity images from 16:50 pm to 17:10 pm. The baby rain cell grows up.

6. 結論

本研究は最新型偏波レーダーによるゲリラ豪雨のタマゴの探知に複数台のレーダーネットワークによる立体観測が有効であることを示し、ゲリラ豪雨の追跡手法を構築した。ゲリラ豪雨の追跡により強降雨強度域が地上で豪雨となる直前に立体観測では捉えられており、より5分、10分といった短い時間が大変重要な結果をもたらすゲリラ豪雨災害に対して、有効な手法となることを示した。ゲリラ豪雨災害は時間との戦いであり、実務の面での適用まで意識したゲリラ豪雨災害軽減に向けた情報としても有効である。そして、ゲリラ豪雨のより早期の予測のためには、タマゴの状態からの危険性を検討し、ドップラー速度が危険性判断の指標となることを示した。

ゲリラ豪雨災害軽減のためには豪雨をもたすタマゴの探知能力を上げ、追跡を行いながら、その降水域の危険予測を行うことが土台となり、早期に降水域を探知することで5分でも10分でも早く追跡、予測が開始でき、避難の時間を稼げることとなる。今後この5分、10分の定量的な予測手法の開発に取り組むことが必要である。本研究はゲリラ豪雨の予測に結びつく第一歩を示した。本研究がゲリラ豪雨災害軽減への助けとなることを願って結語とする。

謝 辞

本 K

参考文献

白石栄一(2009): 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.

中北英一・山邊洋之・山口弘誠(2010):ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究, 水工学論文集, 第54巻.

深町有佑(2009):梅雨期の東アジアを対象とした降水セルの3次元検出アルゴリズムの開発, 名古屋大学修士論文.

Dixon,M., and G. Wiener(1993): TITAN: Thunderstorm Identification, Track, Analysis, and Nowcasting-A Rader-based Methodology, JOURNAL OF ATMOTHPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY, Vol. 10, No.6.

Hand, W. H., and B. J. Conway(1995): An Object-Oriented Approach to Nowcasting Showers, WEATHER AND FORECASTING, Vol.10, pp. 327-341.

Hirano, K and M. Maki(2010):Method of VIL Calculation for X-band Polarimetric Radar and Potential of VIL for Nowcasting of Localized Severe Rainfall -Case Study of the Zoshigaya Downpour, 5 August 2008-, SOLA, Vol. 6, pp.89-92.

Maki, M., S.-G. Park, and V. N. Bringi(2005): Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3 cm wavelength polarimetric radar. J. Meteor. Soc.Japan, Vol.83, pp.871-893.

Sauvageot, H., F. Mesnard and R. Ten'orio(1999): The relation between the areaaverage rain rate and the rain cell size distribution parameters. J. Atmos. Sci.,Vol.56, pp.57-70.

Shusse,Y. and K.Tsuboki(2006),: Dimension characteristics and precipitation efficiency of cumulonimbus clouds in the region far south from the Mei-Yu front over the eastern Asian continent. Mon. Wea. Rev., Vol.134, pp.1942-1953.

Zipser, E. and K. Lutz(1994): The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: a strong indicator of storm intensity and lightning probability, Mon. Wea. Rev., Vol.122, pp.1751-1759.

Early Detection and Tracking of Baby Rain Cell in the Guerrilla Storm Warning Using X-band Polarimetric Radar Network

Eiichi NAKAKITA, Hiroyuki YAMABE* and Kousei YAMAGUCHI**

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

** Institute of Sustainability Science, Kyoto University

Synopsis

On July 28 in 2008, fifty people were washed away and five people were killed by a flash flood of Toga River, Kobe in Japan. Size of the river basin is small, i.e. about 10 km² and it is almost urbanized. The disaster was very tragic and caused by quite localized torrential rainfall that is called “Guerrilla-heavy-rainfall” in Japanese media. The rainfall was produced by an isolated cumulonimbus that grew rapidly. To prevent these disaster, Japanese government recently installed networks of X-band polarimetric Doppler radars over major urban areas in Japan. X-band radar is suitable to realize earlier and more detailed detection of the baby cell, because X-band radar has higher sensitivity and spatial resolution. This research is developing an advanced early detecting and warning systems by the full utilization of the X-band polarimetric radar network.

Keywords: Guerrilla-heavy-rainfall, X-band polarimetric Doppler radar network