

ゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測システムの開発と さらなる高度化に関する研究

A Study on Development and Upgrading of Early Detection and Risk Prediction System of “Guerrilla Heavy-rainfall”

中北英一・西脇隆太⁽¹⁾・山口弘誠

Eiichi NAKAKITA, Ryuta NISHIWAKI⁽¹⁾ and Kosei YAMAGUCHI

(1) 住友重機械工業株式会社

(1) Sumitomo Heavy Industry, Ltd

Synopsis

Recently, localized heavy-rainfall disasters in an urban area, which is called “Guerrilla Heavy-rainfall”, have been gotten a lot of attention in our country since flash flood at Toga river in Hyogo prefecture on 2008. In order to prevent such flash flood damages, X-band Multi Parameter radars (X-MP radars) are equipped near urban areas in Japan recently. In this study, we developed early detection and risk prediction system using X-MP radars. And now, we are trying upgrading this system by exploring the quantitative relationship between rainfall intensity and vertical vorticity in the cumulonimbus calculated from Doppler velocity, which is observed X-MP radars directly.

キーワード: 積乱雲, ゲリラ豪雨のタマゴ, 早期探知, 危険性予測

Keywords: Cumulonimbus, a baby-cell of “Guerrilla Heavy-rainfall”, early detection, risk prediction

1. 研究の背景と目的

2008年7月28日、兵庫県都賀川において、50名が突然の出水によって流され、5名の尊い命が奪われるという水難事故が発生した。この事故をきっかけに、都市域における局地的な豪雨による水難事故に対する関心が社会的に高まった。地球温暖化などの気候変動とも絡めた研究も盛んに行われており、IPCC第5次報告や、気象庁の気候変動監視レポートでは、将来はこのような局地的豪雨が増加する確率は高いと報告されている。特に都市域における局地的豪雨はゲリラ豪雨と表現され、気象用語ではないものの、我が国では、広く知られている。都市域でゲリラ豪雨災害が発生しやすい原因は、例えば都賀

川の場合では、都賀川上流の山岳地域で豪雨となったことに加え、都市域に降った雨が効率よく下水道システムに流れ込んだために発生した河川への大量の横流入にあった。このため都賀川では急激な水位の上昇が発生した。加えて都賀川は普段から親水空間としての役割もはたしており、市民の憩いの場となっていたこともあり、当時は多くの人々が川辺で遊んでいた。このような都市域特有の水環境が都賀川での悲惨な事故を招いた。憩いの場が悲惨な事故現場にならないためには、1分1秒でも注意喚起を早く行い、川辺にいる人々を避難させることが必要不可欠である。そのためにはゲリラ豪雨の予測技術の確立が急務となってくる。

そこで、このようなゲリラ豪雨災害の対策として、

国土交通省は、平成21年度に、従来の監視に使われていたCバンドレーダーよりもさらに時間・空間的に高分解能であるXバンドMP（マルチパラメーター）レーダーを全国の都市域を中心に配備し、監視ネットワークを構築した。従って、このXバンドMPレーダーネットワークを用いたゲリラ豪雨の予測技術の確立が防災上の急務であると言える。これを受け近年、このXバンドMPレーダーネットワークを用いた予測として、VIL（鉛直積算雨水量, Vertical Integrated Liquid water）を用いた豪雨の予測（例えば、Maki et al., 2010）やセル追跡法（例えば、増田ら, 2014）を用いた豪雨予測が行われている。しかしこれらの予測は地上である程度の降雨が観測されてから予測を行う手法であるため、1分1秒でも早い予測が必要なゲリラ豪雨災害の軽減にはもっと早い段階での豪雨の予測が必要である。

そこで本研究では、XバンドMPレーダーネットワークを用いたゲリラ豪雨予報システムを構築し、ゲリラ豪雨による災害を軽減することを目的としている。本研究では、ゲリラ豪雨をもたらす可能性のある積乱雲の上空での「早期探知」と「自動追跡」、さらにその積乱雲が本当に発達し、ゲリラ豪雨をもたらすのか判断するという「危険性の予測」との3つの手法を統合して、レーダーのリアルタイム情報から、地上で降雨が始まるのと同時あるいはそれ以前の早い段階で危険なゲリラ豪雨を予測する早期危険性予測手法を確立する。

また、ゲリラ豪雨の危険性がある地域を早期に予測する早期危険地域予測手法を、この手法に付加させたゲリラ豪雨予報システムの開発に取り組んだ。これにより、例えば、ある河川が危険地域内にあると判断されると避難を喚起することが可能となり、都賀川のような悲惨な災害を未然に防ぐことができるシステムが完成する。また、本研究ではさらに、ゲリラ豪雨の定性的な判断だけでなく、どれくらいの強度の降雨をもたらされるのかという定量的な予測にも取り組み、予報システムの高度化を図った。この定量的な予測は、先に述べた避難の喚起だけではなく、河川の管理にも役立ち、防災上大きな意義を持つと考える。

2. ゲリラ豪雨とXバンドMPレーダー

2.1 ゲリラ豪雨をもたらす積乱雲

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 fig.1 である（白石, 2009⁶⁾）。積乱雲のステージは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、fig.1①では、湿った空気が上昇し凝結することで雲粒になる。この雲粒は非常に小さく現在の気象レーダーでは探知できない。Fig.1②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。ここで、本研究では、この上空でレーダーにより探知されだした降水粒子をゲリラ豪雨のタマゴと定義している。Fig.1③では、このタマゴ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、fig.1④、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fig.1⑥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30分～1時間弱で行われる。このような積乱雲の発達過程の概念から、本研究では対象事例の抽出の際、「30分以内に地上に50mm/hr以上の降雨をもたらすまでに発達した積乱雲」を基準としてゲリラ豪雨の抽出を行った。

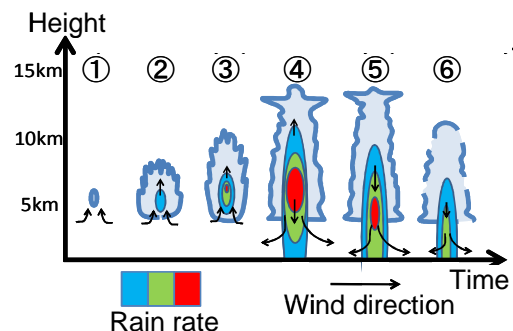


Fig.1 The developing process of a cumulonimbus

2.2 ゲリラ豪雨災害に対する本研究の意義

2.1でも述べたように、ゲリラ豪雨をもたらすような積乱雲の寿命は30分～1時間であり、このタイムスケールの短さが災害発生の要因の一つとなっている。近年このようなゲリラ豪雨災害の予測に関してはVILやセル追跡による地上降雨予測がされていることは1.で述べた。しかしこれらは地上である程度の強度の降雨が観測されてからの豪雨の予測手法である。ゲリラ豪雨災害には1分1秒でも早い予測が必要とされるので、これらの予測手法よりもさらに早い段階での予測手法の確立がゲリラ豪雨災害の軽減には有効である。本研究の意義はまさにここにあると考え、上空で早期に探知したタマゴの段階で危険性を予測し、今までの予測手法よりも早い時刻に危険性を予測する手法を本研究では確立した。ま

た、確立した予測手法は定性的な予測であるため、さらに予測手法を有効なものにするために、タマゴの段階の積乱雲から地上での降雨強度を定量的に予測することにも挑戦した。定性的な予測手法の確立に加え、定量的な予測情報がこれに付加されることで、本研究で開発したゲリラ豪雨の予測手法はさらにゲリラ豪雨災害の軽減にむけ、さらに有意義なものになると考える。本節で述べたことを端的に表現した模式図を fig.2 に示す。赤枠で囲われた部分が本研究で行った内容である。

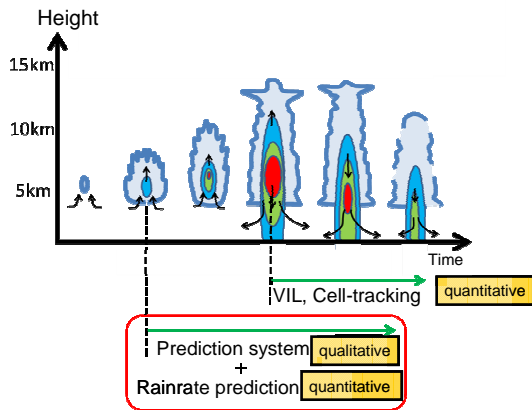


Fig. 2 The purpose of our study

2.3 Xバンド MP レーダについて

そもそもレーダーとは、電磁波のもつ直進性、等速性、散乱性を利用した無線装置である。レーダーのアンテナから放射された電磁波は、目標である降水粒子に当たって散乱し、散乱した一部の電磁波が同一のアンテナに受信される。レーダーはこの電磁波を受信し、アンテナの向きと電磁波の往復に要する時間から目標の位置を測定し、反射波の強さ（レーダーエコー）から目標の性質や大きさを測定するものである。

XバンドとCバンドでは電波の波長が異なる。Cバンドは約5cmなのに対しXバンドは約3cm波長の電波を用いている。このため通常、Cバンドに比べXバンドは細かい空間分解能を持っている。しかしそのかわり降雨による電波の減衰が大きくCバンドと比べて観測範囲は狭い。またMPとは第1章でも述べた通り、Multi Parameter のことで水平偏波による受信電力以外の情報を利用することを意味し、二偏波や二周波の技術が代表的である。そのうち、地上レーダーでは二偏波による観測が実用化されている。この二偏波での観測を行っているため、従来のCバンドコンベンショナルレーダーやドップラーレーダーで観測されていた、レーダー反射因子、ドップラー風速だけでなく、偏波パラメータを得ることができ、さらに先に述べた降雨による電波の減衰の

問題も改善できる。しかしながら、本研究ではレーダー反射因子、ドップラー風速の利用を中心に考えていくのでここではあまり詳しくは触れないことにする。

また、XバンドMPレーダーも一般の気象レーダーのアンテナと同様に機械的に3次元全体を走査することが可能であり、必要に応じて特定の方角方向を走査する。3次元の立体的なエコーを観測する場合は、一定仰角で方位方向に全周走査するPPI (Plan Position Indicator) スキャンを、仰角を変えながら繰り返し行う立体観測（ボリュームスキャン）が行われる。中北らは、このXバンドMPレーダーによる立体観測データを解析することにより、同じXバンドの低仰角のみの観測に比べ約3分早くいち早く上空でゲリラ豪雨のタマゴを探知することに成功した。また、時間分解能も感度もCバンドレーダーより良いXバンドレーダーによる観測であってもそれが低仰角観測であれば、時間分解能も感度もXバンドレーダーより低いCバンドレーダーの立体観測の方が2分も早くタマゴを探知していたという結果を中北らは出している。

即ち、時間分解能も感度も低いという圧倒的な悪条件でも、立体観測を行っているCバンドレーダーが低仰角のみを観測しているXバンドレーダーよりも早期にゲリラ豪雨を探知している。早期探知といってもこのように5分にも満たない時間ではある。しかし、タイムスケールが非常に小さいゲリラ豪雨において、そしてしれが問題となる小河川での早い出水による災害の場合、1分1秒でも早くゲリラ豪雨の存在を探知することが災害を軽減するリードタイムの確保に繋がるため、この立体観測による早期探知の時間は決して軽視できない時間となる。従ってこれらの研究結果は、立体観測が、ゲリラ豪雨の早期発見という観点からゲリラ豪雨災害の防止に極めて有効であると示したと言える。

一般的にXバンドMPレーダーは、河川管理のために低仰角を時間的に密（1分間隔）に観測する運用モードとなっている。しかし上述のような立体観測がゲリラ豪雨監視に有用であるという結果をうけ、全国一律に5分に一度の立体観測を実施している。特に近畿地方では、時間的により密に観測を行うために、観測ネットワークを構成する4レーダーが同時刻に各々違う仰角を観測する観測体制となっている。これにより、地域は京阪神エリアに限られるが、1分ごとの3次元情報の作成が可能となっている。

2.4 観測データの処理について

1回のレーダーの3次元観測は5分を要するため、厳密にはレーダーの仰角ごとに観測時刻が異なる。そ

のため、データの出力された時刻は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立体観測全体の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ドップラー風速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、用いるデータは低い仰角から順次仰角を上げるようなデータセットとして、立体観測データを作成した。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容易に把握できるようにした。本研究での解析対象に抽出したゲリラ豪雨の事例においてタマゴの探知には上で述べた方法で作成したデータを使用し、反射強度やドップラー風速に関しては上で述べた処理に加えて、以下に述べるような処理を施した。

受信電力値や偏波パラメータ値といったレーダーの受信値や偏波パラメータ値は距離方向、方位方向、仰角方向の極座標系で表現される放射状メッシュ単位のサンプリングボリュームの代表値として得られる。しかし、反射因子強度などの3次元画像を作成する際や、各種解析を行うにあたってはデータの空間配置は3次元デカルト直交座標系で表現することによって各種処理が容易になる。したがって本研究では単位放射メッシュごとに得られる値を、3次元デカルト直交座標系（以下、直交座標系と呼ぶ）における格子点上の値に変換する。また本研究では、極座標系を直交座標系に変換する際に水平方向200m×200m、鉛直方向200mという格子を考え、各格子のデータとして格子の中心に格子点データとして受信電力値を与えた。この格子は、Xバンドレーダーの距離方向の分解能が150mであることに注意し、その分解能に対応した大きさで作成している。次に、レーダービームが通過していない格子点に値を挿入するため、鉛直方向に線形に内挿補間を行う。さらに、こうして作成した3次元の格子点データを高度ごとに分類し（200m間隔）、等高度面CAPPIデータとして（CAPPI=Constant Altitude Plan Positioning Indicator）を作成し、高度ごとの反射強度とドップラー風速の平面分布を求めた。また、反射強度に関しては、上述のように作成したデータを水平方向500m×500m、鉛直方向250mの格子点データに平均することにより極座標から直交座標に変換する際に生じた不連続なデータを平滑化し、異常値の除去を行った。また、ドップラー風速でこのような処理を行っていない理

由としては、ドップラー速度はベクトル値であるため、平滑化の処理を行うと、極座標から直交座標に変換する際に生じる誤差にさらに大きな誤差が加わってしまうからである。3章以降では、上述で述べた方法で作成した500m×500m×250mに平滑化した反射強度データと、200m×200m×200mのドップラー速度データを用いていく。

3. ゲリラ豪雨予測手法の基礎

3.1 予測手法の概要

ゲリラ豪雨をもたらす可能性のある積乱雲（タマゴ）の上空での「早期探知」と「自動追跡」、さらにその積乱雲が本当に発達し、ゲリラ豪雨をもたらすのか判断するという「危険性の予測」という3つの手法を連結させたものが、本研究で開発した予報システムの基礎である。このシステムの開発により、上空で早期に探知したタマゴを追跡しながら過度の大きさにより、発達の恐れの有無を早期に判断することが可能になった。Fig.3に積乱雲の発達・衰退過程とともに「早期探知」、「自動追跡」、「危険性の予測」の概念についての模式図を示す。以降の節では、各々の手法について述べる。

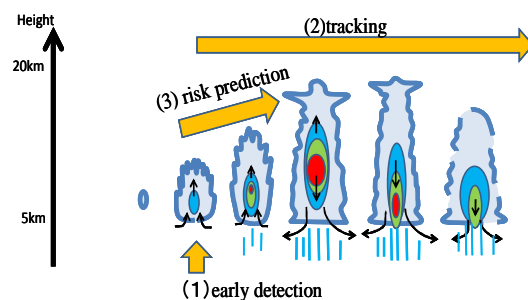


Fig.3 The image of early detection, tracking and risk prediction

3.2 早期探知

中北ら、2011は、XバンドMPレーダーの立体観測を用いて、ゲリラ豪雨のタマゴを上空で早期に探知する研究を行い、立体観測により、低仰角のみの観測に比べ約3分早くタマゴを探知できることを明らかにし、立体観測の有用性を示した。また彼らはさらに、早期探知手法の自動化を行い計算機によるタマゴの抽出するモデルを構築した。本研究では、彼らが提案した自動早期探知モデルを改良したモデルを使用した。

(1) 従来モデルについて

中北ら、2011は、計算機によるタマゴの自動抽出モデルを構築した。本研究では、これを改良したモデルを用いる。そこで、改良点を明確にするために

まず従来モデルについて述べる。

ある時刻に降水域が検出されたとする。なお降水域の定義は、「20 dBZ以上の反射強度で 0.5 km^3 以上の面積を持つ閉曲面」とし、深町を参考にしたCCL (Connected Component Labeling)を3次元に拡張した手法を用いて、3次元的に降水域を検出している。この降水域の重心を中心としたある大きさの球を考える。以下、この球の半径を影響半径と呼び、球のことを影響球と呼ぶことにする。1ステップ前(5分前)にこの影響球内に降水域がなければ、現時刻で検出された降水域はタマゴとする。本研究では5分ごとの立体観測の3次元情報を用いており、降水域の移動速度は最大 60 km/h 程度とされていることから、5分では最大 5 km 移動すると考え、影響半径は 5 km と設定している。Fig.4に従来のタマゴの自動探知手法の概念図を示す。

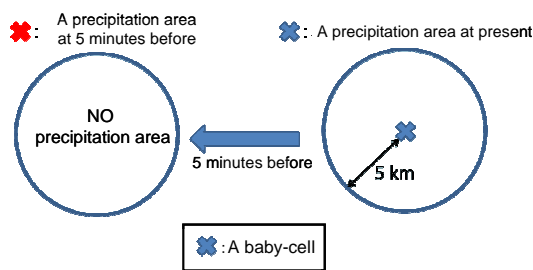


Fig.4 The methodology of early detection

(2) 改良点

本研究では(1)で述べた従来の自動早期探知モデルを以下のように改良した。

a) タマゴの体積制限の変更

従来手法では、タマゴと認識する積乱雲に体積制限を設けていた。この理由は、ゲリラ豪雨のような孤立した積乱雲の場合では、周囲に積乱雲が全くないことが多く、(1)で述べた手法では、5分以上前から存在していた降水セルであっても5分前に影響球内に他の降水セルがなければ、タマゴとみなしてしまうためである。しかし、この体積制限が理由で探知されないタマゴがあつては、早期探知手法として致命傷である。そこで本研究では解析期間から目視で抽出したゲリラ豪雨のタマゴの体積を調べ、その中の最大値が 62.5 km^3 であったため、全期間における自動探知の際のタマゴの体積の上限を従来の 0.625 km^3 から 62.5 km^3 とした。

b) 影響球内に5分前に存在する降水セルに対する条件の付加

従来手法では、影響球内に5分前に降水セルが存在すると、現在の降水セルはタマゴではないとしていた。従って、非常に大きな体積の降水セルによる

探知の妨げや、グランドクラッターによる影響等の理由からタマゴが探知されることがあった。この問題を解決するために、影響球内に5分前に存在する降水セルがあつたとしても、以下の条件を満たしていなければ、影響球内に5分前に存在していた降水セルとみなさないことにした。

1つめの条件は、対流性の降水セルであるための体積の上限より小さな降水セルであることである。このような対流性の降水セルであるための体積制限を設けることにより、本研究で対象としているような対流性以外の降水セルの影響を除去した。

2つめの条件は、降水セルの重心の高度が 2 km 以上であることである。レーダーによるノイズを降水セルと認識することにより、タマゴが探知されないことを防止することがこの条件の目的である。また、たとえノイズでなくても、重心高度が 2 km 以下の降水セルは本研究で対象としている積乱雲となる可能性が低い。事実、抽出した全ての事例でタマゴの重心高度は 2 km 以上であった。

3つめの条件は、過去からずっと存在している降水セルではないことである。これは、5分以上前の過去から存在し続けている降水セルの影響の除去が目的である。この「5分以上前の過去から存在している」という判定については次節で述べる自動追跡の結果を用いた条件となっている。

従来の自動早期探知モデルに、a)、b)のような改良点を加えたモデルを、本研究では使用する。Fig.5にこのモデルを用いた探知結果を示す。各事例とも、左が立体観測で早期に探知されたタマゴの3次元図、右が1分ごとの地上雨量分布である。地上で降雨となる前に上空でタマゴを探知していることがわかる。

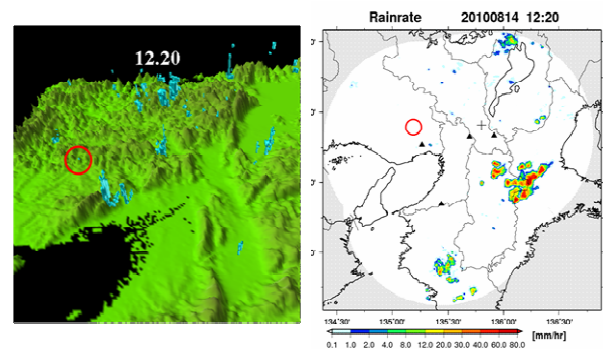


Fig.5 The result of early detection. Left one shows 3-D image and right one shows 2-D rain distribution.

3.3 自動追跡

中北らは、3.2で述べた早期探知の他にも、その早期探知をしたタマゴを3次元的に自動追跡するモデルを構築した。この3次元自動追跡手法は、従来から行われてきた短時間降雨予測よりもさらに短い

時間を予測する超短時間降雨予測への土台となるモデルであるといえる。本研究では、この自動追跡を改良したモデルを使用する。

(1) 従来モデルについて

まずは中北らが構築した自動追跡モデルについて説明する。モデル内では、タマゴ探知の段階をステージ1と命名し、5分後、10分後と時間が進むにつれステージ2、ステージ3と順に命名していく。以下はこの表記を使用する。単独の積乱雲の存続時間は30分~1時間とされており、その中でも発生・発達過程が重要と考えることからステージの最大は6、つまり探知後30分としている。追跡の開始としてまずは、3.2.(2)でも触れたCCL手法により、降水セルを検出し、それぞれのセルに対してナンバリングを行う。また、ステージごとに体積制限を設け、ステージごとに対象となる降水セルを限定することで追跡精度の向上を目指している。各ステージごとで以下のような方法で降水セルに対してのステージを決定している。

なお、 $V_{stageNmin}$ 、 $V_{stageNmax}$ はステージNの体積の下限、上限を示しており、 V は降水セルの体積を示している。

a) ステージ1 (タマゴの探知)

3.2で述べた従来モデルによってタマゴを抽出する。抽出されたタマゴをステージ1とする。

b) ステージ2

a)でステージ1と判定されず、 $V_{stage2min} < V < V_{stage2max}$ の時、ステージ2の判定を行う。その際、3.2と同様の影響球を考える。そして影響球内に5分前にステージ1が存在すれば、一時的にその5分前のステージ1のセル番号を現在の降水セルにラベリングし、同時に5分前のステージ1には現在の降水セル番号をラベリングする。この作業を現在時刻における全ての $V_{stage2min} < V < V_{stage2max}$ を満たす降水セルにおいて行う。そして、この作業が終えた段階では、5分前のステージ1はステージ2の可能性のある現在の複数の降水セルとラベリングが行われている可能性があり、逆にステージ2の可能性のある現在の降水セルは5分前の複数のステージ1とラベリングが行われている可能性がある。そこで、現在ステージ2の可能性のある降水セルと5分前のステージ1について以下の4つのケースを考える。

b1) 5分前のステージ1にラベリングされている現在の降水セルが1つで、その現在の降水セルがラベリングされているステージ1も1つで、お互いのセル番号がラベリングされている場合

この場合はそのまま現在の降水セルをステージ2とする。

b2) 5分前のステージ1にラベリングされている現在の降水セルが2つ以上で、そのラベリングされている現在の降水セルにラベリングされている5分前のステージ1も2つ以上である場合、つまり5分前のステージ1も現在の降水セルも複数番号がラベリングされている場合。

この場合は、追跡を行わず、断念している。

b3) 5分前のステージ1にラベリングされている現在の降水セルが2つで、そのラベリングされている現在の降水セルにラベリングされている5分前のステージ1が1つだけである場合

この場合は、5分前のステージ1とそこにラベリングされている現在の各々の降水セルについて重心の距離の計算を行い、一番距離が近いセルをステージ2としている。また、この時選ばれなかった現在の降水セルについては新たなステージ1と定める。

b4) 5分前のステージ1にラベリングされている現在の降水セルが1つで、そのラベリングされている現在の降水セルにラベリングされている5分前のステージ1が2つである場合

この場合は、現在に降水セルにラベリングされている5分前のステージ1について、現在の降水セルとの距離の計算を行う。そして一番距離が近いステージ1と現在の降水セルとのラベリングを行う。この時、選ばれなかった5分前のステージ1は消滅したと考える。

また、b1)からb4)のいずれの場合にもあてはまらない場合は追跡を断念している。Fig.6にb1)からb4)の場合分けの模式図を示す。

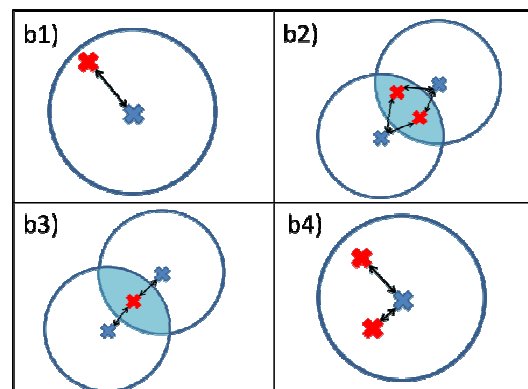


Fig.6 The pattern diagram of b1)~b4)

c) ステージN (N=3~6)

ステージが判別されておらず $V_{stageNmin} < V < V_{stageNmax}$ の時、ステージNの判定を行う。b)と同様に影響球を考え、その影響球内に5分前にステージN-1が存在すれば、ラベリングを行う。以下b)と同様の

方法でステージNの決定を行う。但し、b3)で述べられている「ステージ1と定めている」という過程は存在しない。

(2) 改良点

本研究では、(1)で述べた従来の追跡のモデルに以下のように改良した。

- a) 従来モデルで追跡を断念している場合について
 従来モデルでは(1)の b2)の場合で追跡を断念おり、現在の降水セルに対してステージを与えないことにしている。これは間違った追跡を防ぐという安全面を考慮した対策である。しかし、将来豪雨になる可能性のあるタマゴの追跡失敗による見逃しを防ぎたいという考えから、本研究では、この点に以下のように改良を加えた。b2)にあてはまった場合は現在の降水セルをステージ 1 とした。これにより、実際の発生の時刻からは少し遅れるが、次の時刻以降に再びこの降水セルの追跡を行える可能性を残すことができ、追跡を行えない状況の改善を図った。
- b) 従来モデルの b3), b4)のケースについて
 従来モデルでは(1)の b3), b4)で述べたようにラベリングの数を 2 つと限定していたが、2 つ以上でも対応できるように変更を行った。
 Fig.7にa), b)の2点の改良を行った追跡モデルを用いた3次元追跡の様子を示す。

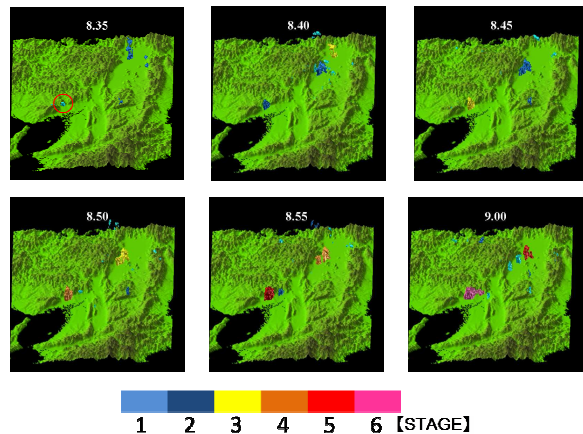


Fig.7 The result of 3-D tracking

3.4 危険性の予知

(1) 既往研究の内容

西脇ら¹⁾は、上空で早期に探知したタマゴが発達してゲリラ豪雨をもたらすのか、あるいは発達せずに消滅するのかという判断をレーダーからの観測値情報であるドップラー速度から定性的に予知する手法を開発した。彼らは、ドップラー速度情報から渦度を算出し、渦度の大小からタマゴの発達、未発達の

予知を行い、未発達に終わるタマゴに高い渦度は存在しないとは言えないものの、発達するタマゴには確実に高い渦度が探知されることを発見した。

(2) 本研究での検討事項

西脇らで示された結果を受けて本研究では、高い渦度がタマゴ探知から何分後に検出されているか、また、地上で最大降雨強度となる時刻から何分前に検出されているかという統計情報を作成した。Fig.8にタマゴ探知時刻を0分とした時の、高い渦度が検出された時刻と頻度分布と、最大降雨強度時刻のばらつきを示す。

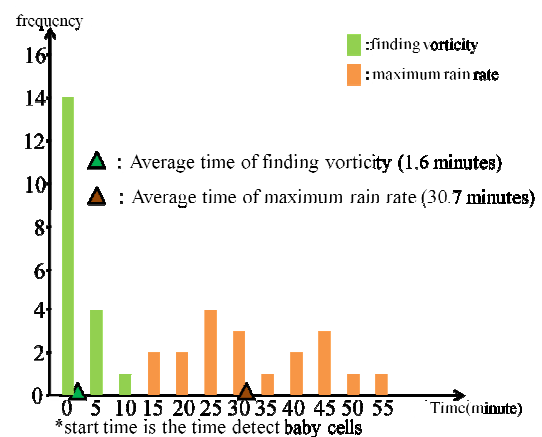


Fig.8 The distribution and average time of vorticity detection and maximum rain rate in developed case

Fig.8 より、渦の発生はタマゴ探知後 1.6 分後、地上での降雨強度が最大となるのはタマゴ探知から 30.7 分後という結果になり、ゲリラ豪雨へ発達するほとんど全ての事例で探知してから 5 分後には高い渦度が検出できることがわかった。本研究のこの結果は中北ら,2013 の後半部分で掲載されている。(中北ら,2013 の前半のドップラー速度から算出された渦度による危険性予測手法に関する記述は西脇ら,2012 の内容と同様の内容となっている。)

また、中北ら,2013 及び西脇ら,2012 で述べられているように発達しないタマゴであっても高い渦度が検出されてしまう場合がある。また、タマゴの段階では高い渦度が検出されず、5 分後、10 分後に高い渦度が検出されることもあることが本研究の統計解析から明らかになったので、これらの結果を踏まえて本研究では、タマゴ探知の時刻に高い渦度が検出されたタマゴを「発達する恐れがあるタマゴ」、5 分後も高い渦度が出ているタマゴを「発達するタマゴ」という認識で予報している。

また、10分後に高い渦度が検出されることを受けて、予測手法では危険性判断の渦度計算を探知後15

分後の降水セルまで行っている。これは統計解析の結果では10分後が最遅であるが、予測手法としてゲリラ豪雨の見逃し、即ちゲリラ豪雨となるタマゴを危険性が低いと判断してしまう事態を防ぐために安全を考慮して探知後15分まで渦度計算を行っている。

4. ゲリラ豪雨予報システムの実用にむけて

4.1 本研究が目指すシステムとは

3. では、「早期探知」、「追跡」、「危険性の予測」という3つの手法を統合し、地上で降雨が始まるのと同時間あるいはそれ以前にゲリラ豪雨を予測する手法を確立した。本章では、3. で確立されたこの予測手法を実際のゲリラ豪雨災害軽減のためのシステムとして利用するために、3. の「追跡」の部分から得られる追跡情報からタマゴの今後の動きを予測し、後にゲリラ豪雨が発生するであろう地域の予測を行った。このような予測を行うことで、システムとしての利用価値が高まると考える。利用方法の一つとして、2008年にゲリラ豪雨災害が発生した都賀川を例にとって河川管理の観点からのシステムの価値を考える。都賀川流域の周辺にゲリラ豪雨の危険なタマゴが早期に探知されたとする。そのタマゴを表示し、5分後には追跡結果から都賀川流域に接近してくると予測されると、設置されているサイレン灯が回転する。これによりまだ都賀川流域で降雨が観測されていない段階での警告が可能となるシステム利用が可能となる。

また、他の利用方法としては一般向けの利用を考えると、自分がいる地域がゲリラ豪雨に見舞われる可能性があるかをシステムを利用することで事前に知ることができる。このように追跡結果を用いたタマゴの移動予測により、3. で開発された予測手法が、ゲリラ豪雨災害軽減に向けた「予報システム」として昇華されると考える。

4.2 危険地域の予測手法について

ゲリラ豪雨の危険地域の予測手法について述べる。タマゴ探知時刻から5分後の追跡結果と危険性予測の結果を用いて、危険と判断されたタマゴについて、5分前からの移動ベクトルを求め、その値を外挿することで、その後のタマゴの動きを予測している。また、タマゴの成長による地上での降水域の広がり表現するために、重心の移動ベクトルを求めると同時に、5分間でのタマゴの体積変化も危険地域の特定の指標として用いた。具体的には、まずタマゴの時点で、タマゴを構成するグリッドのうち、重心から一番離れているところまでの距離を求め、この距離を半径とした球を考える。5分後も同様の計算を行い、

タマゴ探知時と5分後の球の大きさを求めることで5分間での成長度合いを求めた。これを時刻ごとに外挿することで各時刻でのタマゴの成長による地上での降雨域の広がりを表現した。以上のように移動ベクトルとタマゴの体積の広がりの2つの指標を用いて危険地域の予測を行った。Fig.9 に予測手法の概念図を示す。

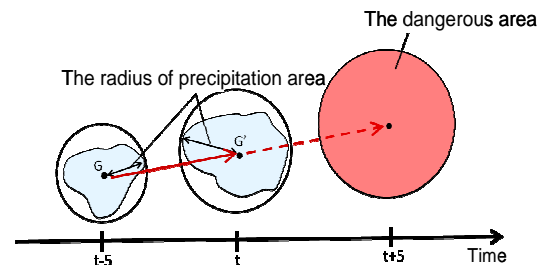


Fig.9 the methodology of dangerous area prediction

4.3 予報システムの表示イメージ

本節では、3. での予測手法と、4.2 で述べた予測手法を用いた出力結果の表示について述べる。

(1) 予測手法の3次元イメージ

本項では、3. で確立した予測手法による出力結果の表示に述べる。まずは table 1 のそれぞれの色分けについて説明する。上空で早期に探知されたタマゴ（ステージ1）については、青と黄で表現されており、青が渦度が低く危険性の低いタマゴ、黄色が渦度が高く危険性が高いタマゴである。このように上空で早期に探知したタマゴの段階で危険なタマゴが判定できている点が本手法の大きな特徴であると言える。次にタマゴが追跡されステージ2の降水セルとなったときに、再度渦度計算を行う。その際の計算結果から、ステージ1からの結果を踏まえて次のように色分けを行う。

- a) タマゴの段階から高い渦度が検出され、ステージ2でなお高い渦度が検出された場合
危険な降水セルとして降水セルを赤色で表記。
- b) タマゴの段階では高い渦度が検出されず、ステージ2で高い渦度が検出された場合
危険な降水セルとして降水セルを赤色で表記。これは、3.3 で述べた通り、ゲリラ豪雨に発達したタマゴの事例において、タマゴ探知時は高い渦度が検出されていなくても、5分後（ステージ2）では高い渦度が検出されている事例があることを受け、このような表記にしている。
- c) タマゴの段階では高い渦度が検出されたが、ステージ2では高い渦度が検出されなかった場合
危険性が非常に低い降水セルとして水色で表記。

これは、3.3 で述べた通り、ゲリラ豪雨にならなかったタマゴの事例において、タマゴ探知時は高い渦度が検出されている場合でも、5分後（ステージ2）では高い渦度が検出されていない事例があることを受け、このような表記にしている。

d) タマゴの段階で高い渦度が検出されず、ステージ2でも高い渦度が検出されなかった場合

危険性が非常に低い降水セルとして水色で表記。

以上a)からd)のような場合分けのもとステージ2での色を決定している。また、この渦度計算をステージ4まで行っている。理由としては、fig.8において高い渦度の検出が探知してから10分後、つまりステージ3の時があることを受けて、さらに見逃し防止のために安全面を考慮し、ステージ4まで渦度計算を行っている。Table1に色分けとそれに対応する降水セルの状態をまとめた表を示す。また、例として2事例の予測結果を地上での降雨分布と共に示す。Fig.10には2013年8月6日の事例の事例の危険性予測手法による結果の3次元表示を示し、fig.11には、同事例の地上降雨強度の分布を示す。

Table.1 The relationship between the color in the 3-Dimage and the status of baby-cells

■	Less dangerous baby-cells
■	Likely dangerous baby-cells
■	dangerous baby-cells
■	Likely safety baby-cells
■	others

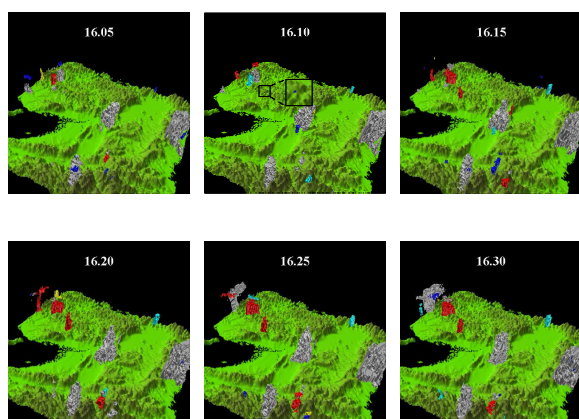


Fig.10 the 3-D image result of risk prediction by our method

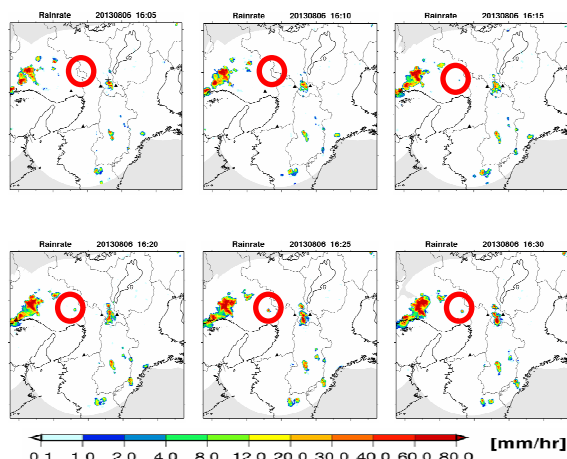


Fig.11 the distribution of precipitation areas

本研究で開発した予測手法の精度についての検証結果について述べる。2010年から2013年の7月、8月を解析期間とし、その中から目視によりゲリラ豪雨を41事例抽出し、これらの事例の時間帯を中心に前後数時間の時間を選択し、予測手法による精度検証を行った。その結果、全体を通して赤色で表示された降水セルは目視で選択した事例も含め125個あり、その中で実際に発達した事例は85個であった。従って赤色で表示された場合に実際に発達する確率は68%と言える。また、豪雨になったにも関わらず赤色で表示されなかった事例は全体で3つあった。この原因としては、タマゴの自動抽出の失敗に尽きる。同時刻に密集してタマゴが発生する状態が数分継続してしまうと3.1で述べた自動早期探知手法では、全てをピックアップできない。見逃してしまった事例ではこのようなタマゴの乱立状態にあり、発達するタマゴがピックアップできなかった。また、赤色で表示されながらも発達しなかった事例では、一度は水色で表示（危険性が極めて低い）とされながらも再び赤く表示された場合が5事例あった。これ渦度計算をステージ4（タマゴ探知から15分後）まで行っていることが原因であり、実際は未発達として衰退しているにも関わらず渦度計算で誤って高い渦度が検出されてしまうことがあった。この件については、渦度の計算をステージ3までに限定すればよいと考えられる。しかし、本研究では防災上の安全を最優先に考えているため、豪雨に発達したにも関わらず赤色にならなかった事例、いわゆる「見逃し」の防止を第一に考えている。故に、fig.8で示した結果からステージ3（タマゴ探知後10分後）で初めて高い渦度が検出されることがあることを受けて、余裕をもってステージ4までの渦度検証を行うことを本研究では優先した。

(2) 危険地域予測の表示イメージ

4.2 で述べた予測手法に基づいて得られた結果の表示イメージについて述べる。

危険地域の表示は赤円で行っており、5分ごとに30分先までの危険地域予測を行っている。以下fig.12とfig.13に危険地域の予測結果を状況と共に示す。

Fig.12は2012年8月17日17時30分に上空でタマゴが赤くなった時、つまり極めて危険なタマゴであると判断された時の、その時刻以降（17:35, 17:40, 17:45, 17:50, 17:55, 18:00）の危険地域の予測を行った結果を、またfig.13にこのタマゴによる地上での降雨強度分布を示す。今後は移動予測の3次元表示も検討しており、またその他の表示として、河川管理を意識したある特定の河川からの表示を行う予定である。都賀川を例にとり、具体的に述べると、まず都賀川流域の周辺において早期に探知されたタマゴを危険性の高さに関係なく全て画面に表示する。そして、5分後に追跡結果と危険性予測結果から都賀川流域に危険なタマゴが接近してくると予測されると、タマゴが赤くなるという表示形式を検討している。これにより、より早期に川に設置されている回転灯が回すことができ、実際に都賀川流域で降雨が観測される前に警報を発することが可能となる。

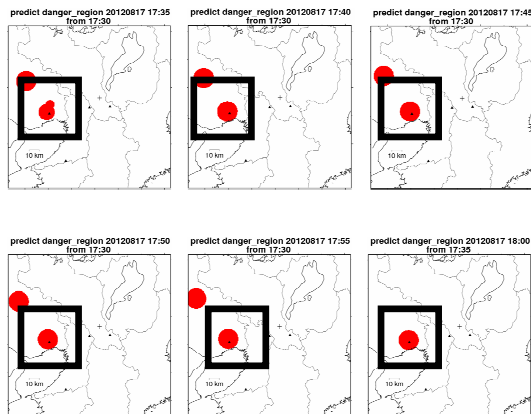


Fig.12 the results of dangerous area prediction

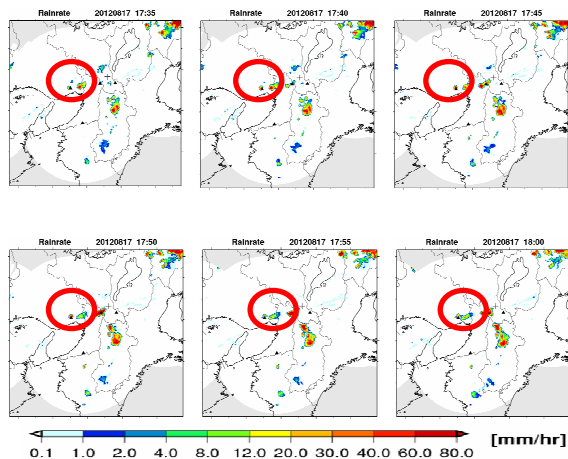


Fig.13 the distribution of precipitation areas.

4.4 本章のまとめと考察

本章では、3.で構築したゲリラ豪雨の危険性予測手法を実用的な予報システムとして昇華させるために、追跡結果を用いた危険地域の早期予測を試みた。このような危険地域の早期予測を行うことで急激な河川の増水に対する事前の対応も行いやすくなり、危険性予測手法に予報システムとしての実用性が生まれると考える。また、危険性予測の結果の表示の方法も工夫を行い、この点でも危険性予測手法から予報システムへの昇華を行うことができたと考える。

さらに、この早期の予測情報は河川管理の立場だけでなく、一般に配信することも考えても非常に有効なシステムになると考える。例えば、このような危険地域早期予測情報をアプリとして各個人が利用できるようなになれば、自分がいる場所がゲリラ豪雨に見舞われる可能性があるか否かを自分で瞬時に確認でき、行政からの指示がなくても避難の判断を自分でできるようになる。また、先の記述では利用方法に関して河川管理と一般配信を別々に述べてきたが、両者を統合した利用方法も当然考えることができる。その一つとして、各個人が、自分の住む町の河川情報として本章で提案した危険地域の早期予測情報を確認すれば、「もうすぐゲリラ豪雨がやってきて〇〇川が危ない」というより身近な気象情報として利用することができる。事実、このように地域に密着した気象情報を「地域気象情報」として住民の防災意識の向上に繋げる取り組みが全国で行われている（例えば、竹之内ら,2013）。本章で提案した早期予測は予報システムとしての様々な可能性を広げたと考え、早期予測手法を「技術」から「誰もが利用できるシステム」へ繋げる橋渡しを試みたことに本章の意義があると考え。本システムによる早期危険地域予測情報の創出は、3章で述べた危険性予測手法をゲリラ豪雨災害軽減のためのシステムたらしめるための大きな一歩である。

5. 予報システムの高度化にむけて

5.1 本章の意義

3.では危険性予測手法について詳細を述べ、4.では、その手法を予報システムへ昇華させる試みを行った。しかし、ここまで本研究で構築してきた予報システムはゲリラ豪雨のタマゴの危険性を定性的に判断するに留まり、「どれくらいの強さの雨が降るのか」という定量情報までは創出できていないのが現状である。もし、本システムに定量情報が加われば、流出による災害リスクに関する研究と融合することにより、上流の山間部での豪雨による河川の流量予測がより早期に行うことができ、ゲリラ豪雨災害の

特徴である「小河川の突然の鉄砲水」による被害の軽減に役立つ。そこで本章では、今後、本システムを用いた定量予測の一步として、上空で探知されたタマゴの渦度と地上での降雨の定量的な関係を検討する。

5.2 渦度からの予測に取り組む意義

近年におけるゲリラ豪雨の定量予測手法の研究としては、VIL やセル追跡法があることは1. で述べた。しかしこれらの手法は地上である程度の強度の降雨が開始されてからの予測であり、タイムスケールが30分程度のゲリラ豪雨においては、充分早期な予測とはならない。事実、2008年の都賀川の水難事故では、地上での降雨が開始されてから7分後に出水が発生している。従って、地上で降雨となるより前の時刻での予測がゲリラ豪雨災害軽減に大きな意義をもつと考えられる。故に、地上で降雨となる前に上空で探知されたタマゴの特徴から、地上での降雨強度の関連性について検討することは、ゲリラ豪雨災害軽減に有効であると考えられる。そこで、このような早期の地上降雨定量予測へむけ本研究では、タマゴの段階での定性的な早期危険性予測への利用に留まっていた渦度を用いて、地上での降雨強度の定量予測を試みた。

5.3 タマゴの渦度と地上での降雨強度との定量的な関係性の検討

(1) タマゴの渦度の時間変化と地上での降雨強度の時間変化との関係

2010年から2013年の各年7月、8月の解析期間からゲリラ豪雨事例を41抽出し、各々の事例に対してまずは、タマゴの渦度の時間変化と地上降雨強度の時間変化の定量的な関係性を検討した。Fig.14及びfig.15に本研究で抽出したゲリラ豪雨事例のタマゴの渦度の5分ごとの時間変化と地上での降雨強度の5分ごとの時間変化を表したグラフを示す。

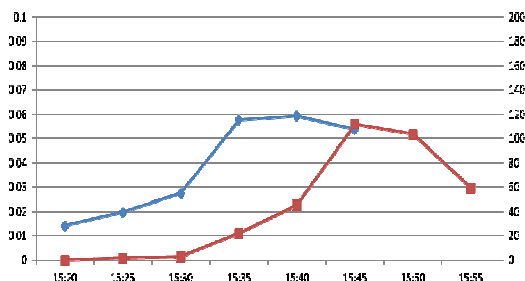


Fig.14 The relationship between vorticity and rainrate. The blue line shows vorticity and red line shows rainrate.

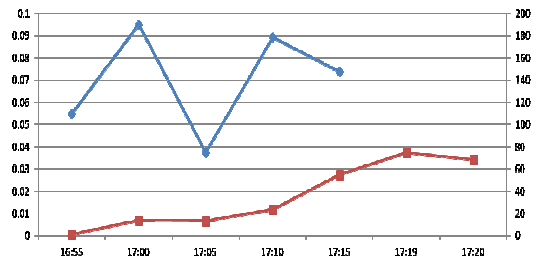


Fig.15 The relationship between vorticity and rainrate. The blue line shows vorticity and red line shows rainrate.

Fig.14では、渦度の時間変化率と地上での降雨強度の時間変化率相関があるように考えられるが、fig.15では、さほど相関があるようには考えられない。そこで、全事例で渦度の時間変化率と、地上での降雨強度の時間変化率との相関係数をとったところ、 -0.22 と小さな負の相関をとった。しかし、fig.14のように渦度の時間変化と地上での降雨強度の時間変化が相関があるようなケースも見られることから、この知見は今後の定量解析にも活かせる可能性があると考えられる。

(2) タマゴ探知時の渦度と地上での最大降雨強度との関係

次に本研究では、タマゴ探知時の渦度の大きさと、地上での最大降雨強度の定量的な関係性について検討した。これは「地上で降雨が開始されていない時刻での危険性予測」を意識してのことである。Fig.16には、タマゴ探知時には高い渦度が検出されなかったものの、豪雨へと発達した事例（以下ケース(a)）に限定した時の、地上での最大降雨強度の頻度分布を示す。縦軸に頻度、横軸に降雨強度をとる。Fig.17には、タマゴ探知時から高い渦度が検出され、豪雨へと発達した事例(以下ケース(b))に限定した時の、地上での最大降雨強度の頻度分布を示す。

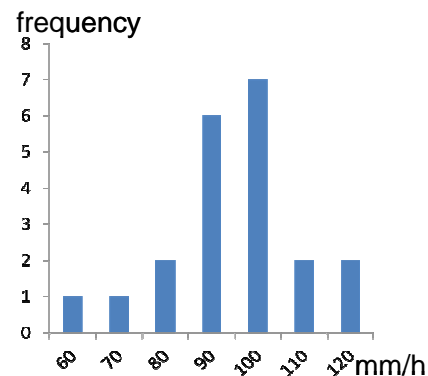


Fig.16 The intension frequency of maximum rainrate in the case that there was not large vorticity when detecting the baby-cell (case (a))

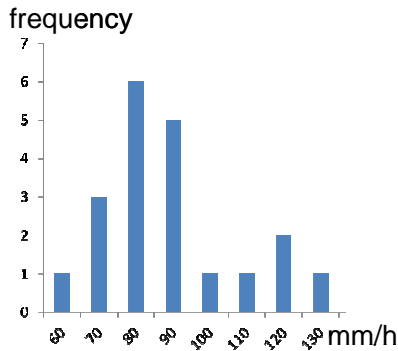


Fig.17 The intension frequency of maximum rainrate in the case that there was large vorticity when detecting the baby-cell (case (b))

まず、ケース(a)に関する特徴について述べる。降雨強度の平均値は、88.9mm/h、標準偏差は14.8mm/hであった。降雨強度が90~100mm/hとなる頻度が21事例中7事例と最も高く、最大値は113.1mm/h、最小値は54.8mm/hであった。次に、ケース(b)に関する特徴について述べる。降雨強度の平均値は、86.2mm/h、標準偏差は18.4mm/hであった。降雨強度が70~80mm/hとなる頻度が20事例中6事例と最も高く、最大値は127.4mm/h、最小値は52.6mm/hであった。ケース(a)とケース(b)を比較すると、ごくわずかな差でありながらも、ケース(a)の方が最大降雨強度の平均が高いことが分かった。

また、fig.18には、ケース(a)とケース(b)を比較したときの特徴を示す。Fig.18では最大降雨強度を、i)80mm/h以下、ii)80mm/h~90mm/h、iii)90mm/h以上、という3つの領域に分割しi)とiii)の領域、つまり、80mm/h以下と90mm/h以上の領域に対して、ケース(a)とケース(b)で頻度に差があることを示している。この頻度の偏りの検証として、 χ^2 乗検定を行ったところ、90%有意で頻度に偏りがあることが明らかになった。

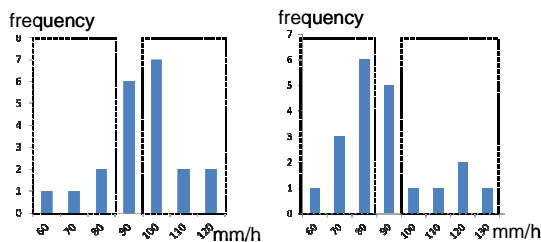


Fig.18 The difference of characteristic between case (a) and case (b).

本項では、タマゴ探知時の渦度に着目し、タマゴ探知時の渦度の大きさにより、地上での最大降雨強度には偏りがあることが明らかになった。このような降雨強度の頻度の違いの発見により、タマゴ探知

時の渦度から「90mm/h以下の強さの雨が降る可能性が高い」という情報の創出が可能となる。このような定量情報を用いると、例えば、竹之内ら、2013が取り組んでいる、降雨強度などの気象情報を、過去の災害などを例に地域住民が直観的に理解しやすい情報へと変換する「地域気象情報」との融合により、早期における住民への具体的な注意喚起が可能になり、ゲリラ豪雨災害の軽減に大きく貢献できると考える。従って本解析で行った、「早期探知されたタマゴの段階での渦度と、地上での最大降雨強度との関係性を頻度分布として創出したこと」、及び「地上での最大降雨強度の頻度の差異を発見したこと」は、地上での最大降雨強度の定量予測手法の一步を踏み出したといえ、今後はこの関係性の物理的な根拠を検討することが必要である。

5.4 フェーズドアレイレーダーの利用

本研究ではXバンドMPレーダネットワークによって得られる5分ごとの3次元情報を用いた解析を行ってきた。しかし近年、ゲリラ豪雨災害軽減を目的に、最短10秒で3次元情報を得ることができるフェーズドアレイレーダーが開発された。そこで本研究では、前節で明らかになったタマゴ探知時の渦度と地上での最大降雨強度の関係性の物理的根拠を探るため、フェーズドアレイレーダーの利用を試みた。

(1) フェーズドアレイレーダーとは

従来の気象レーダーで用いられるパラボラアンテナを機械的に回転させる観測方式ではなく、電子制御によるアンテナスキャンを行い、高速スキャンを実現したのがフェーズドアレイレーダーである。これまでの気象レーダーに比べ大幅なスキャン時間の短縮が最大特徴であり、ゲリラ豪雨などの超短時間気象現象の予測などへの活用が期待されている。

Table 2にフェーズドアレイレーダーとXバンドMPレーダの比較を示す。

Table.2 The comparison between Phased-array radar and X-band radar

	Phased-array	X-band
Scan mode	Electrical scan	Mechanical scan
Observation time	10~30 second	5 minutes
The number of observation angle	110	12
Observation range	30~60 km (variable)	80 km
Resolution - radius -	100 m	150 m
Resolution - azimuth -	1.125~1.2° (variable)	1.2°
Parameter	Reflectivity Doppler velocity	Reflectivity Doppler velocity Polarimetric - parameter

(2) 解析結果

前節では、タマゴ探知時に高い渦度が検出されなかった事例とタマゴ探知時から高い渦度が検出された事例に分けて、地上での最大降雨強度の頻度分布の検討を行った。そこで本研究ではそれぞれのケースによるタマゴ内の反射強度の鉛直構造の時間変化の違いについて両ケース1事例ずつではあるが検討を行った。タマゴ探知時に高い渦度が検出されなかった事例として2012年7月25日の事例を、タマゴ探知時から高い渦度が探知された事例として2012年7月22日の事例の解析を行った。

タマゴ探知時に高い渦度が検出されなかった事例（以下ケース(a)）とタマゴ探知時から高い渦度が検出された事例（以下ケース(b)）の反射強度の鉛直構造の時間変化を30秒ごとに解析を行った結果、発達の過程で主に2つの違いがみられた。1つ目は発達速度である。ケース(a)では、探知後7分後に50dBZに達したのに対し、ケース(b)では探知後9分後に50dBZに達している。2つ目は、発達の鉛直方向への伸びである。両ケースの発達過程の時間変化をみると、ケース(a)は強い反射強度の領域が縦に細長く伸びているが、ケース(b)では縦に細長く伸びることはなく、横への広がりを見せている。このような違いから、ケース(a)は強い反射強度領域が鉛直方向へ急激に伸び、ケース(b)と比べて、局地的かつ瞬間的に強い雨をもたらすことが理解できる。本研究では両ケースにおいて1事例ずつであったが、今後はフェーズドアレイレーダーのような時間的・空間的に高解像度なレーダーによる3次元観測による事例解析を増やすこと、またこれと併せて各々のゲリラ豪雨事例における環境場の解析を進めることで、ケース(a)において鉛直方向へ急激に細長く伸びる物理的根拠が解明する必要があると考える。

6. まとめ

以上をまとめると、本研究ではタマゴの早期探手法と追跡手法、並びに危険性予測手法を統合した一連のゲリラ豪雨予報システムの構築を行い、実利用の視点を考慮したゲリラ豪雨予報システムの構築を行った。そしてさらに定量性を付加させることにより高度化をはかり、今後の早期の定量評価を行うにあたる第一歩を示した。また、フェーズドアレイレーダーのゲリラ豪雨予測へむけた利用についても可能性を示したと考える。最後に本研究がゲリラ豪雨災

害軽減の一助になることを願い本論文の結論とする

参考文献

- 国土交通省(2009)：中小河川における水難事故防止策検討WG報告書。
- 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.
- 気象庁(2012)：気象庁気候変動監視レポート31pp. 竹之内健介・島田真吾・河田慈人・中西千尋・矢守克也(2013)：地域気象情報の共有による減災の取組～伊勢市辻久留地区におけるアンケート調査を通じて～，災害情報，No.11，pp.101-113
- 増田有俊・中北英一(2014)：Xバンド偏波レーダーを用いた降水セルのライフステージ判別手法の開発，水工学論文集。
- 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。
- 中北英一・山邊洋之・山口弘誠(2011)：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，京都大学防災研究所年報，第54号B。
- 中北英一，西脇隆太，山口弘誠(2012)：ドップラー風速を用いた渦解析によるゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，水文，水資源学会2013年研究発表会要旨集，pp.6-7.
- 中北英一，西脇隆太，山邊洋之，山口弘誠(2013)：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，土木学会論文集，B1(水工学)，第69巻，pp.325-330.
- 深町有祐(2009)：梅雨期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。
- 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, 6 pp.89-92.
- IPCC第五次報告(2013)
(論文受理日：2013年6月5日)