

# ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR EARLY DETECTION OF BABY RAIN CELL ALOFT IN A SEVERE STORM AND RISK PROJECTION FOR URBAN FLASH FLOOD

中北英一<sup>1</sup>・西脇隆太<sup>2</sup>・山口弘誠<sup>3</sup>

Eiichi NAKAKITA, Ryuta NISHIWAKI and Kosei YAMAGUCHI

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学防災研究所教授 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学防災研究所助教 気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In 2008, around 50 people who enjoyed sunny days along the riverside were flushed away by a sudden flash flood in a small river channel (Toga River) in Kobe urban area of Japan. In order to prevent such flash flood damages, it is very necessary to detect the rain-cells, which may develop to severe storm, as soon as possible and to alert people to evacuate from riverfront before the severe events occur. In this study, we develop a detection technique for the early stage of rain-cell (hereafter, baby-cell) in the middle atmospheric layers before it generates heavy rainfall on the ground. The early detection technique is utilizing the 3-D volume scanning data from X-band Multi Parameter radars (X-MP radars) network (XRAIN), which are equipped near to the most urban area in Japan recently. In our recent study using the 3-D volume scanning information from the X-MP radars, we have successfully developed an algorithm (1) to detect newly generated baby-cells, (2) to identify dangerous level of the baby-cells, (3) to trace the movement of the baby-cells and their united prediction systems.

**Key Words :** *Urban, Flash Flood, XRAIN, X-MP radar, Rainfall prediction, Baby rain cell, First echo, Doppler radar, Polarimetric radar, Evacuation, Early warning*

### 1. はじめに

2008年7月28日に兵庫県都賀川で発生した鉄砲水による水難事故以来、「ゲリラ豪雨」というキーワードが社会現象化し、都市域を中心とした局地的豪雨への関心が高まった。突然の豪雨も当然のことながら、それに伴う都市域の小河川の水位の急上昇がゲリラ豪雨災害の特徴であり、都賀川の場合は降り始めてから7分後に出水が生じた。したがって、このような時間スケールが極端に小さな災害では、5分でも10分でも早い注意喚起が防災上、必要不可欠となってくる。

そこで中北ら<sup>1),2)</sup>は、1982年以来継続的に立体観測を継続していた国土交通省深山レーダ雨量計(Cバンドレーダー)の3次元画像を解析して、都賀川での鉄砲水の原因となった局地的豪雨、その豪雨をもたらした積乱雲が急激に発生・発達するごく初期の段階に、上空での

み最初に存在するレーダーエコー(初期エコーあるいはファーストエコー)が確認できることを明らかにした。加えて、それが都賀川出水時の30分前には出現していることから、避難にとって極めて重要な、ゲリラ豪雨の早期探知に欠かせない情報であり、防災の観点からこのファーストエコーの早期探知を現業化すべきとの提案を行い、そのファーストエコーを、防災的観点から「ゲリラ豪雨のタマゴ」と命名した<sup>1),2)</sup>。

一方、国土交通省は、2010年から順次、全国の政令指定都市を中心に既存のレーダ雨量計よりも時間・空間ともに高解像度でかつ精度良く降雨強度を推定できるXバンドMP(マルチパラメーター(ドップラー偏波))レーダーを配備し、3次元ドップラー観測をも標準としたゲリラ豪雨災害への観測体制を強化した。現在では35機による観測ネットワーク(XRAIN)を構築している。中北ら<sup>3)</sup>は、多数の事例で地上強雨がもたらされるより前に「ゲリラ豪雨のタマゴ」が上空で出現すること、ドッ

プレー風速により推測される渦度が確認されるときにはほぼ確実に積乱雲が強化されることを、XRAIN観測情報で確認できることを明らかにした（空振りは存在する）。本研究はこれらの知見を発展させて早期探知・予測システムのプロトタイプを構築することを目的とする。

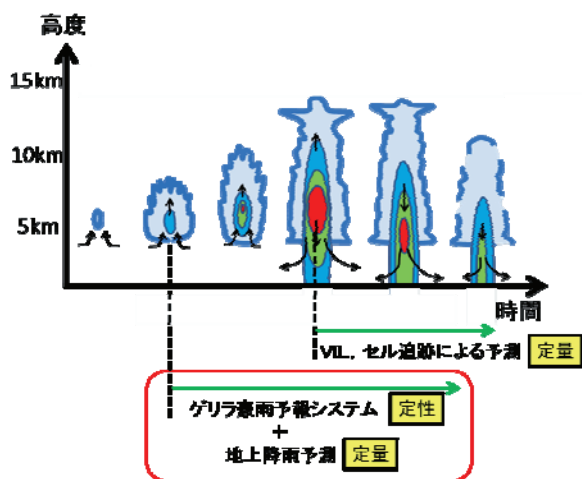


図1 ゲリラ豪雨災害軽減へ向けた本研究の意義。  
(赤枠で囲われた部分が本研究の内容である)

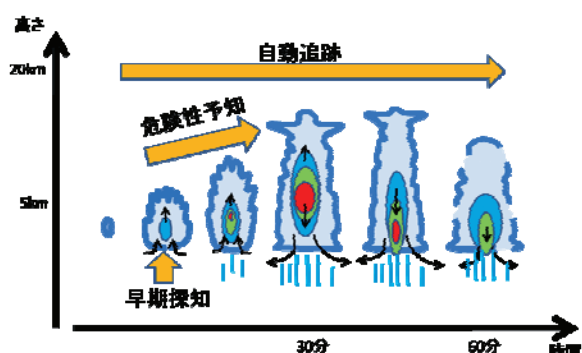


図2 ゲリラ豪雨予測システムの概念図

## 2. ゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測

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の予測に関しては、VIL (Vertically Integrated Liquid water) の連続式を考慮したもの<sup>4)</sup>、セル追跡等による地上降雨予測<sup>5)</sup>が、やはりXRAIN導入の利点を活かして開発されてきている。しかし図1に示すように、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。ゲリラ豪雨災害を防止するためには5分でも10分でも早い避難情報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極めて重要である。図1の赤枠で示すように我々の一連の研究<sup>1), 2), 3)</sup>の意義はまさにここに

ある。本研究では図2に示すような、上空で早期にタマゴを自動探知すること、探知したタマゴの段階で危険性を渦度により予測し、3次元的に自動追跡することを統合し、他の手法よりも早い時刻に危険性を定性的に予測する手法を構築する。また、あくまで予備的な検討ではあるが、予測手法をさらに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10分、20分後の降雨強度を定量的に予測することにも挑戦した。

さて、図3より、渦の発生は上空でのタマゴ初期探知から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分かっている<sup>3)</sup>。またもちろん、中北ら<sup>3)</sup>が述べ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統計解析から明らかになっているので、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」という認識で危険性予測をすることとする。

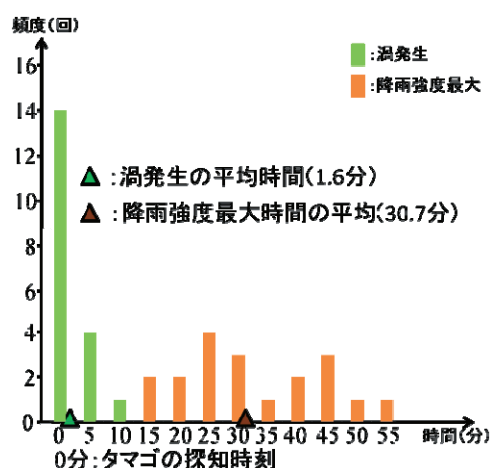


図3 タマゴ探知時刻を0分とした時の渦初期探知時刻と地上降雨強度最大時刻の頻度分布<sup>3)</sup>






また、10分後に初めて高い渦度が検出される場合もあることを受けて、危険性予測手法では、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うこととする。すなわち、統計解析の結果では10分後が最遅であるが、危険性予測手法としてゲリラ豪雨となることを見逃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うこととする。

## 3. 早期探知と定性的危険性予測の統合システム

予報システムは、後に豪雨となる可能性のある積乱雲

(ゲリラ豪雨のタマゴ)を地上で降雨となる以前に上空で早期に探知し、探知したタマゴを追跡しながらそのタマゴが本当にゲリラ豪雨まで発達する恐れがあるか否かを判断し、発達する恐れがあるタマゴを3次元的あるいは2次元的に表示するものとなっている。

表1 表示される降水セルの色とその時の降水セルの状態

	a) 危険性が低いタマゴ (ステージ1のみ)
	b) 危険性が高いタマゴ (ステージ1のみ)
	c) 危険な降水セル (ステージ2以降)
	d) 危険性が非常に低い降水セル (ステージ2以降)
	e) その他 (本研究の対象外となる体積の大きな降水セルなど) (ステージ2~4)

3次元画像が5分ごとに得られる中、表1のように危険性のカテゴリーを定義する。すなわち、上空で早期に探知されたタマゴ (ステージ1) については、紺色と黄色で表しており、紺色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。次にタマゴが自動追跡され5分後にステージ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。

#### ステージ1:

- a) 渦度が相対的に低いタマゴ (紺色)
- b) 渦度が相対的に高いタマゴ (黄色)
- e) 本研究の対象外となる体積の大きな降水セル

#### ステージ2~4:

c-1) タマゴの段階(ステージ1)から高い渦度が検出され、ステージ2でもなお高い渦度が検出される場合 (赤色) : 危険な降水セルとして降水セルを赤色で表記。

c-2) タマゴの段階(ステージ1)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る場合 (赤色) : 危険な降水セルとして降水セルを赤色で表記。

(これは、2. 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。)

d-1) タマゴの段階(ステージ1)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い場合 (水色) : 危険性が非常に低い降水セルとして水色で表記。(これは、2. 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-2) タマゴの段階(ステージ1)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 (水色) : 危険性が非常に低い降水セルとして水色で表記。

e) 本研究の対象外となる体積の大きな降水セル

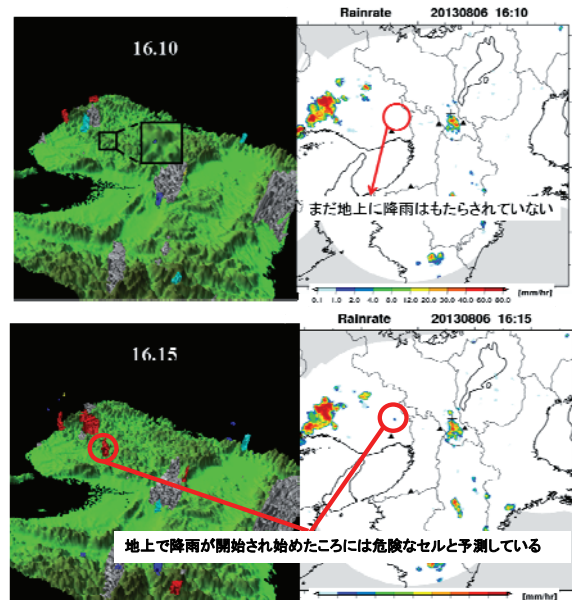


図4 危険性予測の例 (その1)

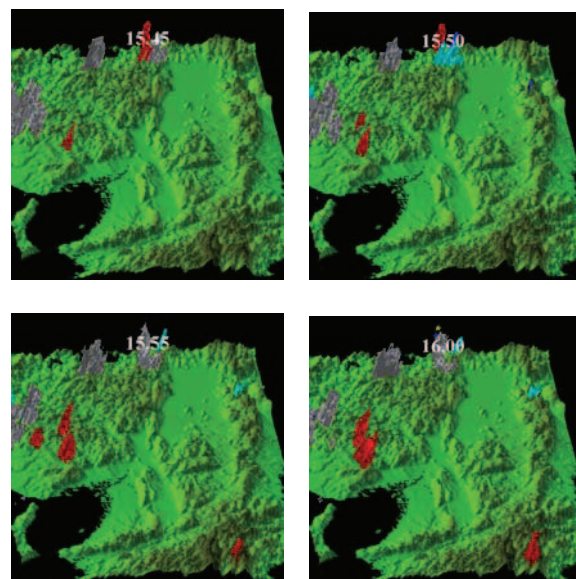


図5 危険性予測の例 (その2)

ここで、渦度計算をステージ4まで行っている。理由としては、図3に示したように、タマゴが探知されてから10分後、つまりステージ3の時で高い渦度が初めて算定される場合があることを受けて、見逃し防止のために安全面を考慮するためである。危険性予測の例として、図4に2013年8月6日の事例の、最初にタマゴを早期探知された時刻と、危険と予測された時刻の危険性予測指標の3次元表示と、地上降雨強度の分布を示す。タマゴが



探知された時点で右の水平分布に赤丸を付すシステムとしている。16時10分時点で、上空のタマゴのみ探知されていて地上（正確にはレーダー観測最下層）にはまだ降雨強度が探知されていない状況、さらには、5分後の第2ステージにはd-1)としての危険性予測がなされている事例を示す。この事例では、16時30分以降に至るまでセルが発達し続けた。加えて、異なる積乱雲の事例を図5に示した。初期からc-1)に対応する赤色の危険性予測がなされ、それが鉛直・水平方向ともに発達していることや赤表示が継続していることなど、危険性予測が良好に推移していることがわかる。

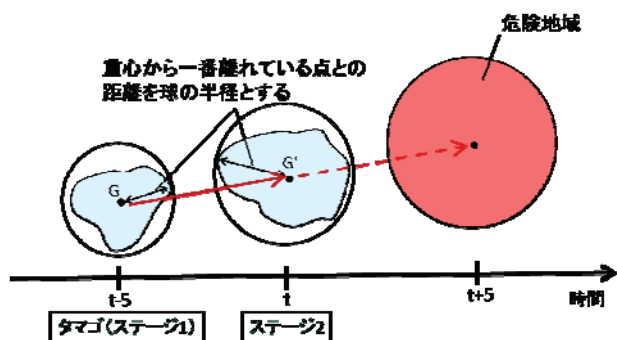


図6 危険地域予測手法の模式図

#### 4. 統合システムへの危険地域予測の追加

##### (1) 本研究が目指す予測システムとは

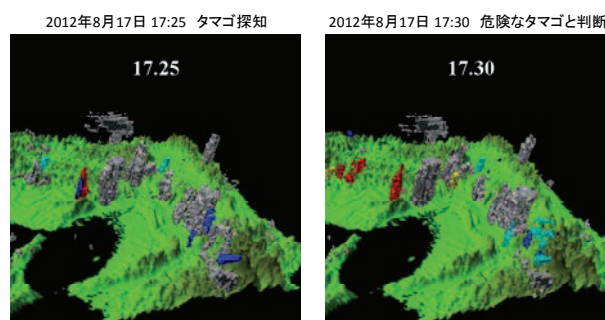
3. では、「早期探知」、「追跡」、「危険性の予測」という3つの手法を統合し、地上で降雨が始まるのと同様あるいはそれ以前にゲリラ豪雨を予測する手法を確立した。本章では、3. で確立されたこの予測手法を実際のゲリラ豪雨災害軽減のためのシステムとして利用するために、3. の「追跡」の部分から得られる追跡情報を用いてタマゴの今後の動きを予測し、後にゲリラ豪雨が発生するであろう地域の予測を行った。このような予測を行うことで、システムとしての利用価値が高まると考える。利用方法の一つとして、2008年にゲリラ豪雨災害が発生した都賀川を例にとって川辺で遊んでいる人々の観点からのシステムの価値を考える。都賀川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という、そのような、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夢のシステムが可能となる。

##### (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。図6に予測手法の説明図を示す。

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2つの指標を用いて危険地域の予測を行った。



この5分間の移動ベクトル及び体積変化を元に位置と誤差を含めた危険地域を予測

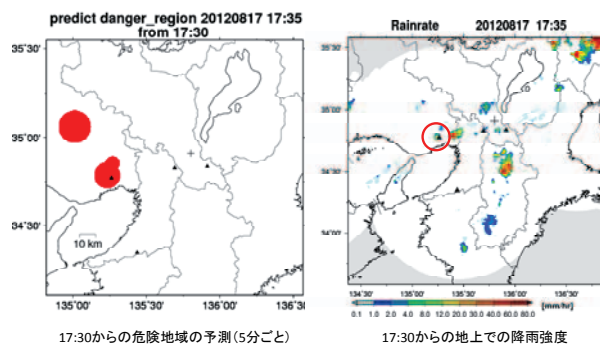


図7 危険地域の予測事例

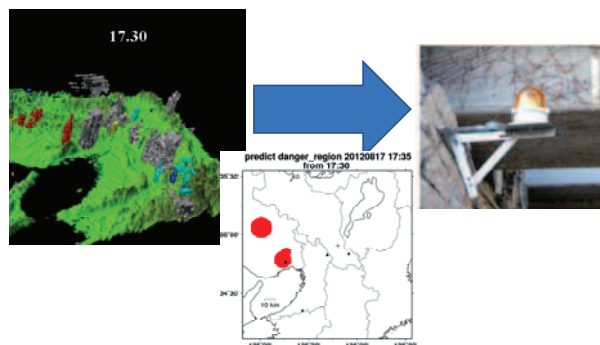


図8 実用的な利用方法の例のイメージ（川辺からの視点）

図7に、上記予測手法に基づいて得られた結果を示す。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（図では予測は5分先の結果のみを示している）。ここで、上段は、移動予測と体積変化を算定した5分前と現時点の3次元表示である。左図は、2012年8月17日17時25分に六甲山上空でタマゴが初めて探知され、この時点では低渦度の紺色表示となっている。右図は、その5分後の17時30分に上空でタマゴが赤くなった時の3次元表示である。下段は、危険地域の5分先予測結果（左）を観測状況（右）と共に示す。これらは「一般向け」への利用を考えた表示で、たとえば近畿全体を俯瞰した情報を提供するシステムと言える。これに加え今後は移動予測の3次元表示も検討している。

一方、逆方向からの視点も重要である。すなわち、ある特定の河川からの意識での表示も重要である。都賀川を例にとり、具体的に述べると、図8に示すように、都賀川流域に危険なタマゴが接近し流域が危険地域になると予測されると、川辺に設置されている回転灯が回転する、といったシステムも実現可能である。これが、2008年以来ゲリラ豪雨のタマゴの早期探知に取り組み始めたときから著者が描いてきた究極のシステムである。手法としての土台は本論文で構築された。後は地方自治体・国が協同すれば実現するシステムであると考えている。

## 5. 定量的な危険性予測に向けて

3. では危険性予測手法について詳細を述べ、4. 5. では、その手法を予測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”に判断するもので、「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していない。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、小河川の出水流量・水位予測を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、本システムへの定量性への付加の一步として、上空で探知されたタマゴの渦度と地上での降雨量の定量的な関係を解析する。

### (1) 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、VIIやセル追跡法があることは2. 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。したがっ

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える。そこで、このような早期の地上降雨定量予測へ向け、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。

### (2) タマゴの渦度と地上での降雨強度の定量的な関係性の検討

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タマゴの渦度と地上降雨強度の時間定量的な関係性を調査した。

図9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。図10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。図9同様、縦軸に頻度、横軸に降雨強度をとる。

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わかった。しかしながら、ケース(a)、ケース(b)共に、標準偏差が大きく、ばらつきが大きいため、早期の定量予測には渦度の大きさ以外にも、タマゴの発生高度、重心高度の時間変化や、タマゴに含まれる雨水量の時間変化等の様々な物理指標を総合的に検討する必要がある。

しかし、ここで注目すべき点がある。図11に強調するように、ケース(a)であるタマゴの段階で高い渦度が検出されない場合は90mm/h以上に達する可能性が高く、逆にケース(b)であるタマゴの段階で高い渦度が検出された場合は90mm/h以下にしか達しない可能性が高い。この違いは10%有意水準の $\chi^2$ 乗統計的検定で有意と判断され、明瞭に分かれたこの結果をうまく利用する方法を今後考えて行ける可能性がある。また、この結果は一見、逆のように思えるので、この理由を探っていくことは重要で興味のあるところであり、その理由を土台にあらたな利用手法が生まれる可能性もある。さらに、この理由を探る新たな観測手段として、超高時間分解能な観測により

タマゴ～最大降雨強度に至るプロセスの詳細観測が可能なフェーズドアレイレーダーがクローズアップされる。

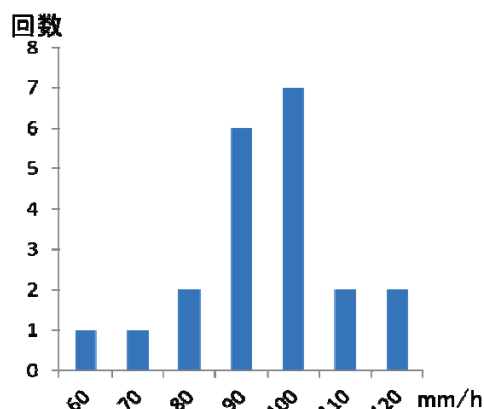


図9 タマゴの時点で大きな渦度が検出されなかったものの、発達した事例における最大降雨強度の頻度分布. 横軸は降雨強度、縦軸は頻度を示す。

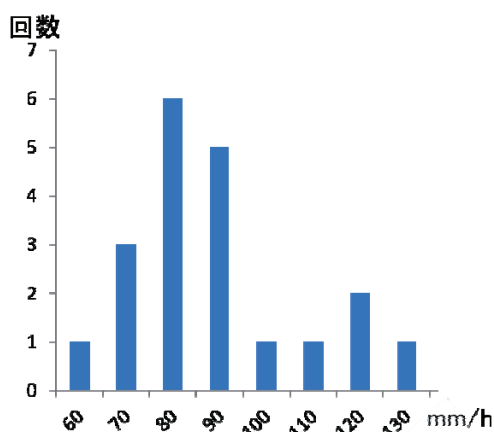
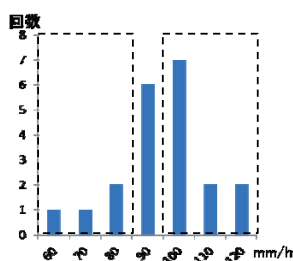


図10 タマゴの時点から大きな渦度が検出され、そのまま発達した事例における最大降雨強度を示す。

タマゴの段階では高い渦度が検出されなかった事例における地上での最大降雨強度の分布



タマゴの段階から高い渦度が検出された事例における地上での最大降雨強度の分布

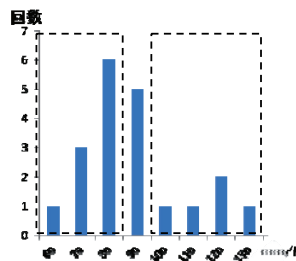


図11 渦度の違いによる到達最大強度の強調比較

## 6. まとめ

本研究は、2008年7月28日兵庫県都賀川で発生した鉄砲水による水難事故、すなわち悪い場が突然悲惨な場

になるというあの災害以来、「ゲリラ豪雨」、「ゲリラ豪雨のタマゴ」、「タマゴの早期探知」、そして「渦度を用いた危険性予測」をキーワードに進めて来た一連の研究の最終段階に位置する。危険性予測が都賀川のサイレン灯点灯と直接結びつくことを夢見て進めて来た。そういう意味でのシステム化を最終段階として進め、その結果をここで示した。

すなわち、タマゴの早期探知手法と追跡手法、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測システムの構築を行った。そしてそれ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りその第一歩を示した。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可能性についてもその大きな1側面を示したと考える。

また、ここで示した基本的な考え方は国土交通省で採用され、ゲリラ豪雨の危険性予測システムとして既に省内で試験運用が開始されている<sup>6)</sup>。今後、サイレン灯システムとのタイアップも進んでゆくよう祈念したい。

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って本論文の結びとする。

**謝辞：**本研究の前半は、国土交通省河川技術開発「XバンドMPレーダ等の観測情報の活用に関する技術開発」(2010-2013)からデータの提供も含めサポートをいただいた。同時に、科学研究費補助金基盤研究(S)「最新型偏波レーダーとビデオゾンデの同期集中観測と水災害軽減に向けた総合的基礎研究」(代表：中北英一)(2010-2014)からも絶大なるサポートをいただいた。この場を借りて切に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 中北英一・山口弘誠・山邊洋之：レーダー情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析，京都大学防災研究所年報，第52号B，pp.547-562，2009.
- 2) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.343-348，2010.
- 3) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：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57巻，pp.325-330，2013.
- 4) Kohin Hirano, Masayuki Maki: 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, SOLA, vol6, pp89-92, 2010.
- 5) 高田 望・田中裕介・池淵周一・中北英一：局地的な大雨の予測精度向上を目指した降水ナウキャスト手法の開発，土木学会論文集，B1(水工学)，第57巻，pp.349-354，2013.
- 6) 国土交通省近畿地方整備局，レーダ雨量計技術応用研究委員会資料，2014.

(2014. 4. 3受付)