

気象レーダーを用いたゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測

中北英一（京都大学 防災研究所 気象・水象災害研究部門）

1. 平成 20 年のゲリラ豪雨災害

平成 20 年は、7 月 28 日に神戸の都賀川、そして 8 月 5 日には東京雑司ヶ谷で、ゲリラ豪雨による悲惨な災害が起こった。都賀川では川辺の親水空間を楽しんでいた約 50 名が 14 時 42 分の突然の出水によって流され児童ら 5 名が亡くなった(図-1)。一方の雑司ヶ谷では、幹線下水道の強度補強の工事中に 11 時 40 分ごろの急激な増水により作業員 6 名が流され、うち 1 名は自力で脱出したが、5 名が流されて亡くなった。

もちろん河川を管理し、工事を発注している自治体はこういった出水に対して細心の注意を払ってきたが、それでも生じたこの二つの悲惨な災害には、1) 予想を遙かに超えた急激な出水、ならびに 2) 人が水流のそばにいたことに共通点がある。予想を超えた急激な激しい出水をもたらした原因としては、

積乱雲が突然発生し急激に発達して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もたらされたこと、

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った雨が素早く下水道システムに流れ込んだこと、

を挙げることが出来る。まさしく、いくつかの要因が重なって悲惨な災害が起きた。ゲリラ豪雨の発生も含めて、ある意味、都市故の災害であったと言えるかも知れない。そして、5 分でも、10 分でも早い避難情報がどれほど重要かを防災関係者に愕然と認識させた災害であった。今後は、予想を超えた急激な出水にも備えないといけない。

2. ゲリラ豪雨とは

次に、ゲリラ豪雨とは何か、「通常の集中豪雨」との違いは何かを説明する。「ゲリラ」という言葉は、いわゆる「テロ」を想像させますので気象庁では「局地的集中豪雨」と呼んでいます。しかし、都市生活の日常の場で悲惨な災害を突然もたらすという、災害を意識した警告の意味で私は「ゲリラ豪雨」の方を多用してる。



図 1 神戸、都賀川の急激な出水

「ゲリラ豪雨」も「通常の集中豪雨」も積乱雲によってもたらされる。積乱雲とはいわゆる入道雲のことで、「大気が不安定」な時に発生し、縦方向の遙か上空まで発達し、何 10 万トンという水を上空に発生・蓄積させ、やがてはそれらを落して地上に豪雨をもたらす。では、大気が不安定とは何だろうか？ 地表面付近の大気下層に暖かい湿った空気があり、上に冷たい空気がある場合、暖かい空気は軽く冷たい空気は重いので、下層の空気は上昇しようとして上層の空気は下降しようとする。すなわち上下にひっくり返りやすくなる。これが「大気が不安定」と呼ばれる状態である。加えて、湿った空気が上昇すると途中で湿気（水蒸気）が凝結して雲になり、その時に凝結熱を放出するので益々暖かく軽くなって上昇の勢いが増す。極めて激しい上昇気流が形成されることになる。大気の破壊現象といってもよいくらいである。

通常の集中豪雨では、最初に発生し移動しながら発達する積乱雲のすぐ後ろに繰り返し新たな積乱雲が発生して、赤ちゃん・幼稚園児・小中学生・高校生・大人の積乱雲によるファミリーが形成される。一つ一つの積乱雲の寿命は高々 30 分～1 時間程度だが、積乱雲のファミリーがいったん形成されるとそのファミリーは 6 時間以上の長きにわたり持続され

るので、長い時間豪雨をもたらしますし、気象レーダーではそのファミリーが徐々に近づいてくるのがわかる。

一方のゲリラ豪雨はファミリーとは別に、晴れている中でも突然に単独の積乱雲が発生し急激に成長します。これは、ファミリーが形成されるだすときの最初の赤ちゃん雲の発生と同じなのだが、突然発生しかつ急激に発達するので気づきにくく、かつレーダーでも予測が難しい。すなわち、レーダーで探知されだして5~10分後には豪雨をもたらすし、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分弱を要していた（現在では1分以下）。



図2 ゲリラ豪雨による出水20分前の都賀川上空の様子

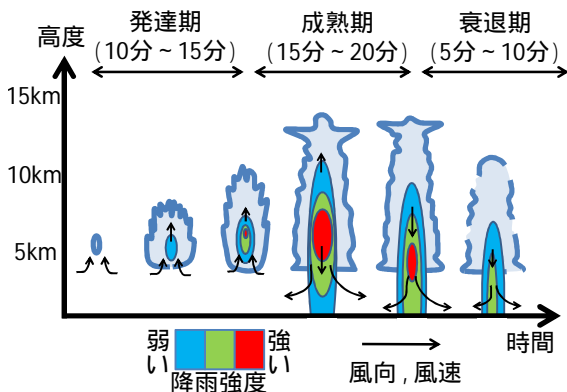


図3 単独積乱雲の発達過程

都賀川災害の場合、図2に示すように、ついさっきまで陽射しがあった中、突然河川流域全体で雨が降り始めたのは出水の約10分前なので、そのレーダー画像が配信されたのは出水直前か直後ということになる。すなわち、突然探知される雨が降り始めてからわずか10分後に出水があったのに加えて、その情報が到着するのが出水とほぼ同時だった。これでは避難する時間はない。5分でも、10分でも早い避難情報がどれほど重要かがおわかりいただけると思う。

実はゲリラ豪雨をもたらす積乱雲は夕立をもたらす入道雲と同じです。通常は、大気が不安定な時に日射で暖められやすい向きにある山岳斜面で上昇気流が発生し、それが積乱雲に発達しながら都市域にも移動してくる。小学高低学年のころ、田舎の小河川で泳いで遊んでいるときには、モクモクときたりゴロゴロときたら川から離れるよう言い含められていたのを思い出す。あの時は、雷が危ないからそう言い含められていると思っていた。突然の出水に対する注意も含まれていたのだとは当時は認識できていなかったような気がする。

最近では、やはり日射で暖められやすいコンクリートやアスファルトで広く覆われている都市域でも発生しやすくなっている。また、都会の憩いの場として河川に親水空間が設けられ人々が河川空間を満喫できるようになってきている。すなわち、人が危険な川辺という場所に再びもどってきたとも言える。今回のゲリラ豪雨災害は川から水が溢れない中での災害であります。

3. ゲリラ豪雨とその早期探知及び危険性予測

前述の都賀川や雑司ヶ谷の局地的豪雨災害ではともに5名の命が失われた。それ以来、「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、このような極端に短い時間スケールの災害では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る。

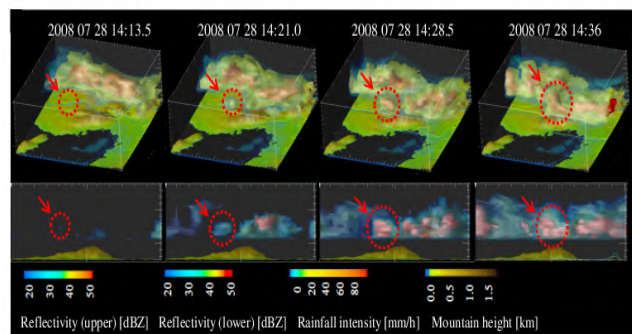


図1 都賀川豪雨時の深山レーダー立体観測画像 時刻毎に上段は南東北西方向を見たもの、下段は南から北方向を見たもの^{3),4)}。

3.1 ゲリラ豪雨の早期探知

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（図 1）。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、防災の視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^{3), 4)}。

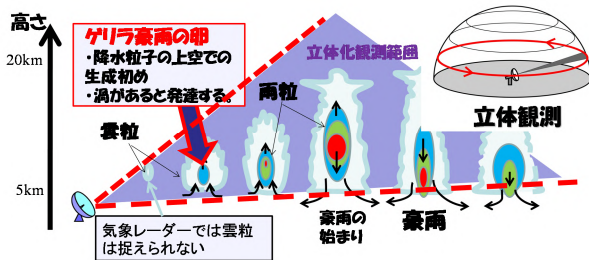


図 2 積乱雲のライフステージとゲリラ豪雨のタマゴ

今少し図 2 を用いて説明をする。図は、単独の積乱雲が発生、発達して成熟期を過ぎて消滅してゆく様子を示したもので、気象レーダーの立体観測によりこれらを捉えていることを示している。縦軸は高さ、軸は示していないが横軸は 1 時間程度先までの時間である。上昇流によって水蒸気が凝結して雲がまず形成される。雲粒の粒径はミクロンオーダーであり C バンドレーダーや X バンドレーダーといったいわゆる降水レーダーでは探知できない（Ka バンドレーダーといった雲レーダーでは探知できる。後述）。その後、雲粒が集まりミリオーダーの粒径をもつ降水粒子が上昇流に支えられて上空でまず生成され出す。その後さらに多くの降水粒子が上空で形成され、上昇流で支えきれなくなると一挙に地上にたたきつけられるように降る。これが局地的豪雨（ゲリラ豪雨）である。時間を遡ると、豪雨時の 10～20 分前に上空でのみ降水粒子が形成され出す。レーダー立体観測ではファーストエコーとして上空で観測されることになる。前述のようにこのファーストエコーをゲリラ豪雨のタマゴと呼んでいる。

3.2 鉛直渦度による危険性予測

前述のように、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 バンド偏波ドップラーレーダーを配備し、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^{1), 3), 4), 5)}。現在では 39 機による観測ネットワーク（XRAIN）を構築している。これら XRAIN 観測情報を調べたところ、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、積乱雲が強化される（最大降雨強度が 50mm/h 以上となった）場合はほとんど確実にドップラー風速により推測される鉛直渦度がある程度の値を持つことが明らかとなった^{3), 6)}。

図 3 はゲリラ豪雨に発達した（最大降雨強度が 50mm/h 以上となった）35 事例におけるタマゴ探知時刻からの経過時間の頻度分布を表している。黄緑色のグラフは 0.015 [1/s] 以上の最大鉛直渦度（以下では高い鉛直渦度と表記する）が探知された時間を、

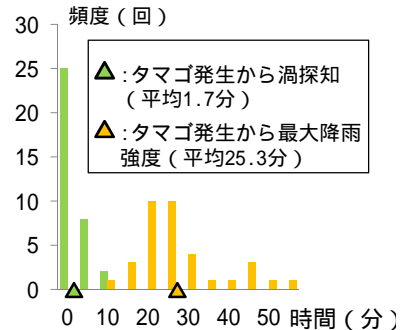


図 3 タマゴ探知時刻からの経過時間の頻度^{3), 6), 7), 8)}

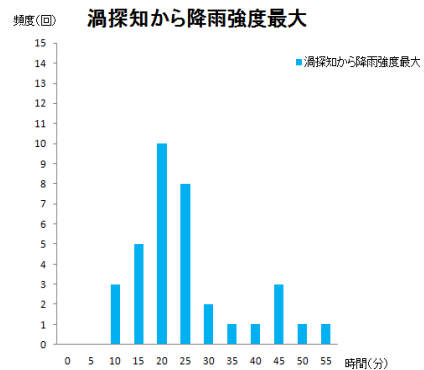


図 4 渦探知時刻から最大降雨強度までの経過時間の頻度分布³⁾

オレンジ色のグラフは地上（正確にはレーダー観測最下層だが、以下簡単のために「地上」と記す）での最大降雨強度時間を表している。一方、図4は高い鉛直渦度が探知されてから地上で最大降雨強度となるまでの時間の頻度分布を表す。ここで、防災の観点から、危険側に予測を行うため4台のレーダーで別々に渦度を計算した後、3次元格子毎に4台の最大値を出力している。

これらのグラフより、タマゴが早期探知された時点か次の観測時点である5分後には積乱雲内部で高い鉛直渦度が探知され、その後最大降雨強度がもたらされていることがわかる。すなわち、時間的余裕も含め、鉛直渦度がゲリラ豪雨の危険性予測に極めて有効であることがわかる。

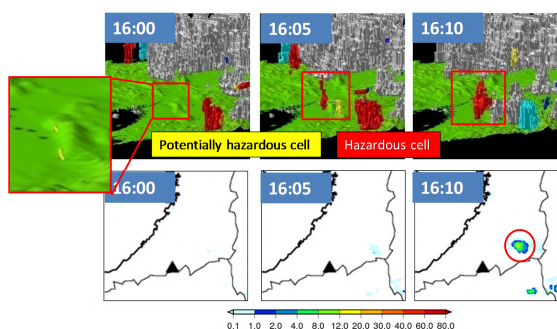


図5 タマゴによるゲリラ豪雨の早期探知と鉛直渦度による危険性予測例^{3), 8)}

4. 早期探知・危険性予測システム

以上示したように、地上で最大降雨強度がもたらされる10～30分前にはゲリラ豪雨のタマゴの早期探知が可能で有り、発達する場合にはその時点か直後には高い鉛直渦度が観測される。すなわち、タマゴがゲリラ豪雨の早期探知、高い鉛直渦度がゲリラ豪雨の危険性予測に利用可能である。これらを結合して以下のようなゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測システムが構築されている^{3), 8), 9), 10)}。

図5はタマゴによるゲリラ豪雨の早期探知と鉛直渦度による危険性予測例を示したものである。上段がXRAINで捉えられた積乱雲の3次元形態、下段がXRAINのプロダクトとして実時間でウェブ公開されている地上降雨強度の推定値である。16:00にタマゴが探知され黄色で表示されている。5分後の16:05には上空へと発達したタマゴが赤色で表示されている。黄色はタマゴ探知時点から高い鉛直渦度が算定されていることを示し、赤色は自動追尾した

5分後でも高い鉛直渦度が算定されて居ることを示す。ともに、最大降雨強度が50mm/h以上となる（以下では「危険なゲリラ豪雨になる」と記す）危険性が高いことを示しており、特に赤表示はほとんど確実に危険なゲリラ豪雨になるとの意味で用いられている。また、上空で黄色表示された時点では地上に降雨がもたらされていないことがわかる。そして、地上に弱雨がもたらされた時点では、すでに上空の表示が赤色になっている。ちなみに、水色で表示されている積乱雲は、初期に高い鉛直渦度が算定されたものの5分後には低い鉛直渦度となったものを示しており、空振りを少なくするための表示である。以上が京都大学で開発したシステムである。

国土交通省近畿地方整備局では、上記システムの実運用化を並行して進め、2014年から試験運用を開始し毎年システムの改良を進めて来ている⁸⁾。研究室での開発哲学は、“見逃さない手法を構築して人の生命を守る”であるため、“危険化するゲリラ豪雨は初期から高い鉛直渦度を保持する”という事実を利用した。しかし、実運用システムとしては、これに加え“空振りを少なくする”ことも大切なこととな



図6 国土交通省により試験運用されている局地的豪雨探知システム(ゲリラ豪雨の早期探知と鉛直渦度による危険性予測システム)^{3), 9)}

る。そのため、鉛直渦度だけでなく、エコー頂、その発達速度やドップラー風速から推定される水平風の収束・発散なども指標として危険性予測するシステムとしている。図6は、近畿の市町村、大阪管区气象台、気象庁本庁、国土交通省に公開されている「局地的豪雨探知システム」である。XRAINによる降雨強度表示旧ウェブ画像の上に、タマゴが探知された時点に色のついた輪が表示される。輪の色(黄

色、朱色、赤色)が危険度ランク、輪の大きさが上空に浮いている積乱雲の体積(レーダーエコーの体積)を示している。また、カーソルを重ねると、指標の数値が表示される。現在、見逃し、空振りともに20%程度の精度で運用されている。なお、XRAINでは全国的に通常は5分ごとの立体観測、1分ごとの地上観測を実施しているが、5台のXバンドレーダーの連携オペレーションにより、近畿地方の京阪神周辺上空に対しては1分ごとの立体観測を実現し、1分ごとに表示を更新している。

5. おわりに

以上、XRAIN を用いて実用化されたゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測を紹介した。特に、積乱雲の中に存在する鉛直渦管の存在が重要で、それをベースにした現業用早期探知・危険性予測システムも紹介した。

この紹介したシステムは積乱雲からの雨が地上に到達するより前に利用する定性的な予測システムである。一方、地上に雨が降り出しレーダー画像として雨域が認識されるようになると、そのその観測降雨強度分布や雨域追跡によって得られる予測降雨強度分布を用いて水位予測を行うことができる。図7はそのようなシステムの一例である。山地流域・都市流域を水文流出モデルで物理的にモデル化し、多数の降雨事例を用いて流出シミュレーションを実施することにより、どの水位まで達するかを降雨継続時間~降雨強度テーブル上にあらかじめ整理しておく(ルックアップ・テーブル) 実際の観測降雨や予測降雨を用いて水位を予測することが可能である。

このように、レーダー観測・予測情報が流出モデルと組み合わせられて水位等のリアルタイム予測がど

んどん実現されていくことを願っている。

謝 辞

本稿は科学研究費補助金基盤研究(S) 22226010 (2010~2014年度),15H05765(2015~2019年度)による研究の中、ゲリラ豪雨関係をまとめたものである。ここに謝意を表します。

引用文献

- 1) 中北英一, 集中豪雨のモニタリングと予測, [特集]防災の水工学, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第29巻, 第3号, pp.203-210, 2010.
- 2) 山地秀幸, 土屋修一, 川崎将生, CバンドMPレーダ雨量計とXRAINによる高精度広域雨量観測, 土木技術資料, 第58巻, 第7号, pp.26-29, 2016.
- 3) Nakakita, E., H. Sato, R. Nishiwaki, H. Yamabe and K. Yamaguchi, Early Detection of Baby-Rain-Cell Aloft in a Severe Storm and Risk Projection for Urban Flash Flood. *Advances in Meteorology*, 2017, Article ID 5962356, pp.15. 2017.
- 4) 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, pp.343-348, 2010.
- 5) 五道仁実, 内藤正彦, 土屋修一, Kdp-R関係式の適用範囲拡張によるXバンドMPレーダの観測精度の向上, 土木学会論文集, B1(水工学), 第58巻, pp.505-510, 2014.
- 6) 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.
- 7) 中北英一・佐藤悠人・山口弘誠, ゲリラ豪雨のタマゴ生成時における渦管構造の基礎的解析, 土木学会論文集, B1(水工学), 第72巻, No.4, pp.199-204, 2016.
- 8) 中北英一, 西脇隆太, 山口弘誠, ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発, 河川技術論文集, Vol.20, pp.355-360, 2014.
- 9) 片山勝之・山路昭彦・中村文彦・森田宏・中北英一: 局地的豪雨探知システムの開発, 河川技術論文集, Vol.21, pp.401-406, 2015.

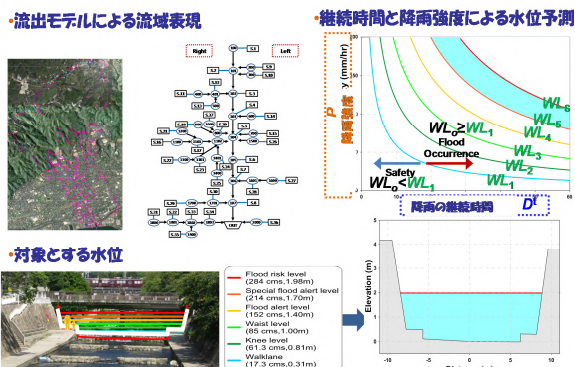


図7 気象レーダーを用いた出水水位の予測システム