

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-A-1

最新型気象レーダーを用いたゲリラ豪雨の
早期探知・危険性予測とメカニズム解明

京都大学・教授

中北英一

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

最新型気象レーダーを用いた

ゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測とメカニズム解明

京都大学 防災研究所

中 北 英 一

1 はじめに

集中豪雨の予測は、古くて新しい課題である。'17年7月には九州北部豪雨によりが生じた。積乱雲が発生しては移動する後方で次々と新たな積乱雲が発生することにより持続するという、梅雨期に典型的な後方形成型の線状対流系による豪雨であった。しかし、対流系の継続時間が典型的なケースより長く、もたらされた総降雨量が通常の倍程度も有り、出水だけにとどまらず流域内至る所で沢が崩壊し多量の土砂と流木が下流の村々に押し寄せ、梅雨豪雨災害としては極めて多くの犠牲者をもたらした。'18年7月に生起した西日本豪雨では、広い範囲に同時生起することにより、梅雨豪雨ではあり得ない広範囲での土砂災害、洪水災害をもたらした200名以上の尊い命が失われた

この後方形成型の線状対流系による梅雨豪雨については、'10年の本紙第29巻第7号¹⁾に、そのメカニズム、レーダー観測、大気モデルによるレーダー情報の同化予測を紹介した。前日、半日前からのピンポイント予測はまだ難しいが、その後'12年7月の亀岡・京都豪雨、8月の宇治豪雨、'14年8月の広島豪雨、そして上述の九州北部豪雨のメカニズムの解明や予測実験が続けられている。また、今回の異常な総雨量は地球温暖化の影響もあるのではないかとの疑問が有り、気候変動影響評価コミュニティでは全球スケール～メソスケール現象の専門家が共同してその疑問に答えてゆこうとしている。

さて、やはり、本紙第29巻第7号¹⁾で述べたように、'08年の7月末、8月初めの神戸都賀川や東京雑司ヶ谷での局地的集中豪雨災害(ゲリラ豪雨災害)が生じた。梅雨豪雨のように複数の積乱雲群による豪雨ではなく、1時間程度の寿命しかない単独の積乱雲による豪雨が発生させた鉄砲水災害である。また、それに伴い国土交通省では立体観測を通常観測とするXバンド偏波ドップラーレーダー観測網(XRAIN)を全国の政令指定都市に整備しだしたことも紹介した。現在では、39機のXバンド偏波ドップラーレーダーによりネットワークが完成している。現在は既存のCバンドレーダー(レーダ雨量計)も順次偏波ドップラー化が進み、39機のXバンド偏波ドップラーレーダー観測と合わせて高精度高詳細広域雨量観測網をXRAINという名の下整備が進んでいる²⁾。(本紙第29巻第7号¹⁾で述べたように、偏波レーダーは、2種類以上の偏波面(電界がプラス・マイナスに振動する面で、通常は水平および垂直偏波が使われる)を使って観測するレーダー、ドップラーレーダーとはレーダービーム方向の降水粒子の動きをドップラー効果によって観測するレーダーである。)

本稿では、XRAINを用いて実用化されたゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測を紹介するとともに、Xバンド偏波ドップラーレーダー(降水レーダー)、Kaバンド偏波ドップラーレーダー(雲レーダー)等による観測、LESモデルによるコンピューターシミュレーションによるメカニズムの解明について紹介する。

2 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

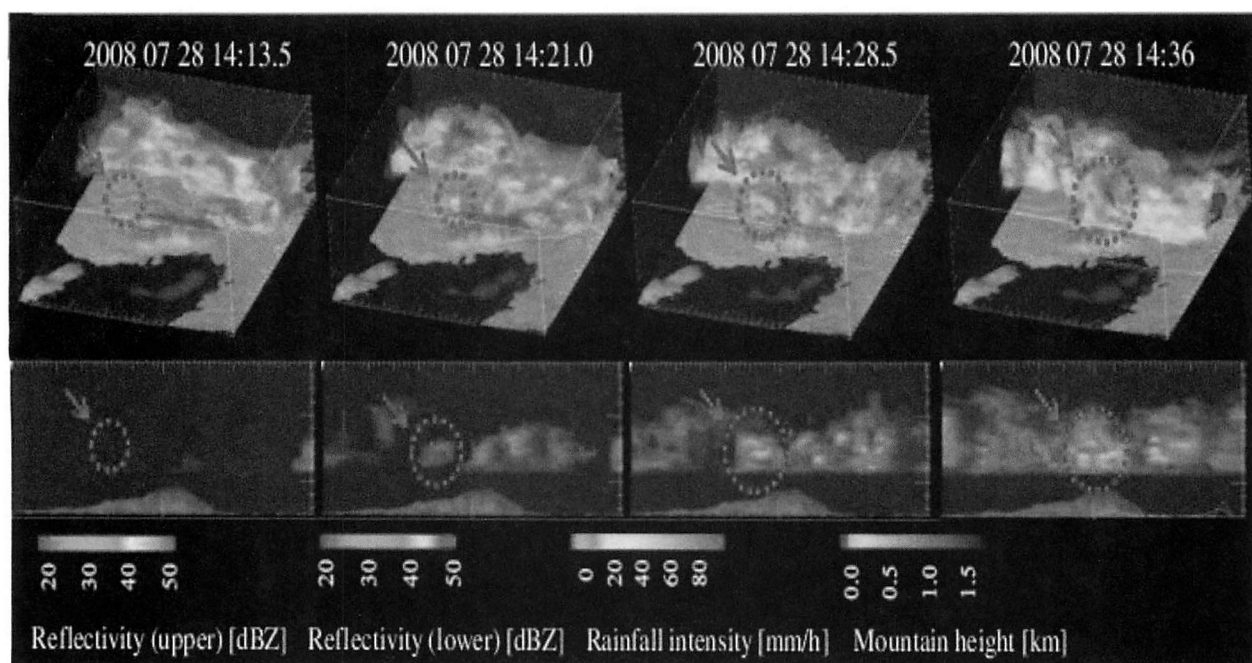


図1 都賀川豪雨時の深山レーダー立体観測画像。時刻毎に上段は南東か北西方向を見たもの、下段は南から北方向を見たもの^{3), 4)}。

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

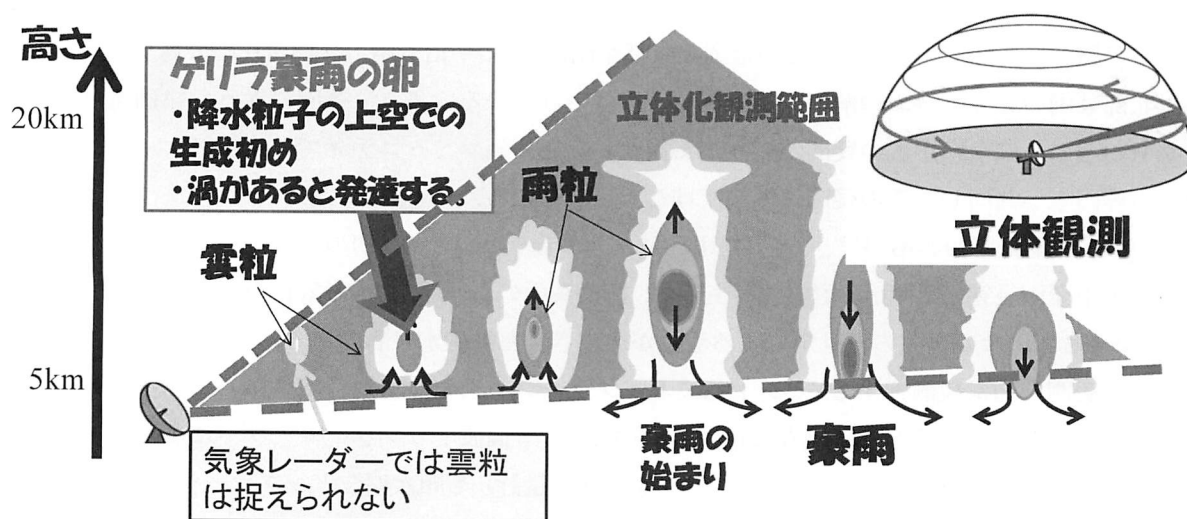


図2 積乱雲のライフステージとゲリラ豪雨のタマゴ

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ってくる。

2.1 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ー雨量計（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)}。

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。

2.2 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)}。

今少し説明を加える。北半球における渦度は低気圧回転（反時計回り）が正の値をとり，鉛直渦度 ζ の定義式は，

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1a)$$

と表せる。ここで， (x, y) は水平位置， (u, v) は水平風速である。しかしドップラー風速の観測で得られるのはレーダービーム方向の風速のみであり，方位角方向（レーダービームの回転方向）の情報を得ることができない。ここで，渦が図3のように存在すると仮定すると渦度は2地点の方位角方向の風速差を2地点の距離で除した値を2倍することで近似的に算出することができる。すなわち，擬似渦度として式(1b)のように表現した；

$$\zeta = 2 \cdot \frac{v_a - v_b}{2r}. \quad (1b)$$

また，渦度の絶対値が0.01 [1/s]より大きな鉛直渦度を解析対象とした。

図4 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，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

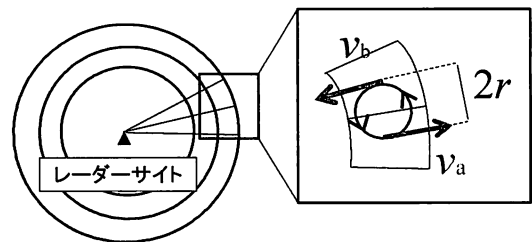


図3 渦度の算出手法の概念図

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5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。

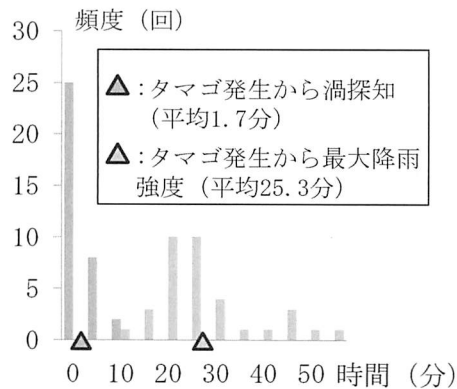


図4 タマゴ探知時刻からの経過時間の頻度^{3), 6), 7), 8)}

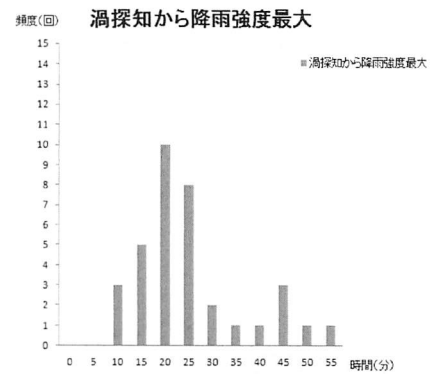


図5 渦探知時刻から最大降雨強度までの経過時間の頻度分布³⁾

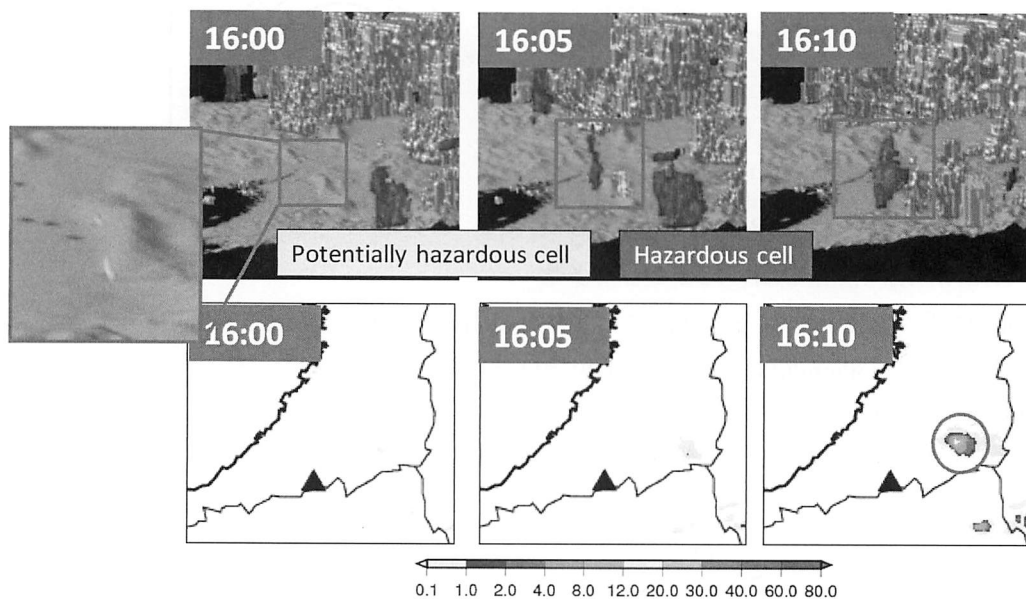


図6 タマゴによるゲリラ豪雨の早期探知と鉛直渦度による危険性予測例^{3), 8)}

2.3 ゲリラ豪雨の早期探知・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あり、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6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



66

図7 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)}

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7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。

一方、情報通信研究機構（NICT）では、国土交通省が開発した上記手法を、同機構が研究開発したフェーズドアレイ（Phased array）ドップラーレーダー2機による京阪神上空の3次元情報に適用して図8に示すシステムを開発し、神戸市の危機管理室に配信することにより試験運用を実施している⁹⁾。このシステムの特徴は、30秒に一度にXRAINよりも高い空間分解能で観測が可能であるフェーズドアレイレーダーによる観測情報を用いることにより、より早期のタマゴ探知に期待が寄せられている。ただし、より空振り防止に対する対応が求められる。もう一つ大きな特徴がある。すなわち、神戸市危機管理室との議論により、ゲリラ豪雨災害の危険性がある区、小河川流域、アンダーパス道路、浸水域が、危険度に応じて表示され職員携帯電話

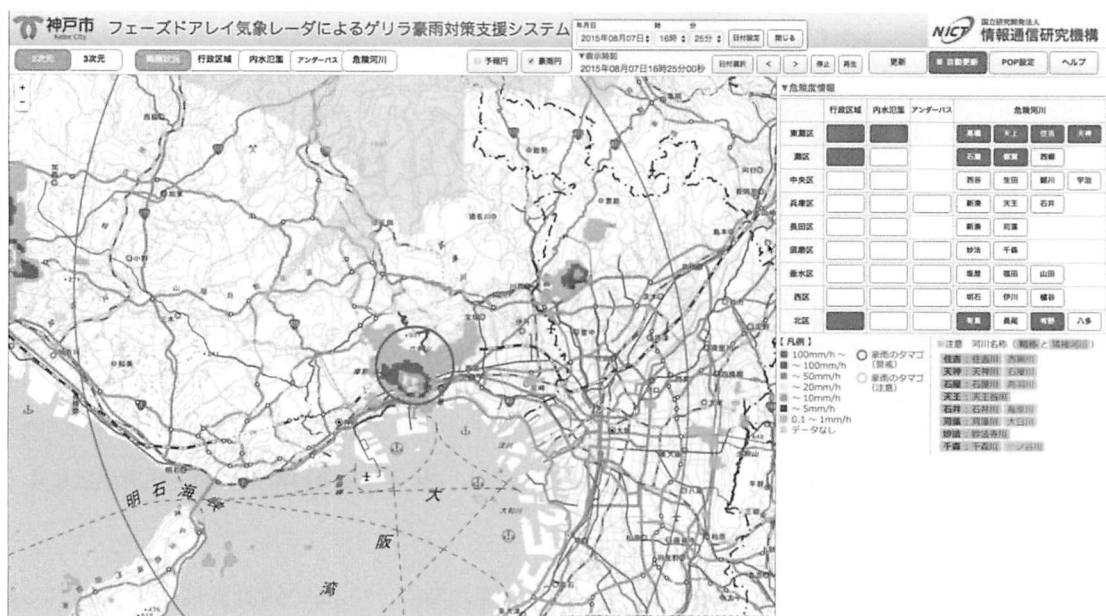


図8 情報通信機構により開発され神戸市危機管理室で試験運用されているゲリラ豪雨対策支援システム（ゲリラ豪雨の早期探知と鉛直渦度による危険性予測システム）¹⁰⁾

へも通知されるなど、よりユーザーを意識したシステムとなっている。

3 積乱雲が内包する鉛直渦管構造

前章では、ゲリラ豪雨のタマゴの早期探知、危険性予測、そしてその実運用システムについて説明した。その中では最大鉛直渦度が大切な役割を果たしている。本章では、そもそも何故鉛直渦度が大切な役割を果たすのか、鉛直渦度がどのような構造を持っているか、を解析した結果を示す。

3.1 鉛直渦管の形成

複数の積乱雲があたかも一つの積乱雲のように組織化されて寿命も単独積乱雲より長いスーパーセルに関する研究（例えばCotton¹¹⁾, Klemp¹²⁾）では発達初期の渦管構造が図9のように説明されている。一方、ゲリラ豪雨をもたらすような時空間スケールの小さい単独積乱雲の発生、発達過程の渦に関する既往研究はほとんど行われておらず、タマゴ内部のメカニズムについて不明な点が多い。そこで実践から理論に立ち返り、高い渦度を持つタマゴが発達するメカニズムに

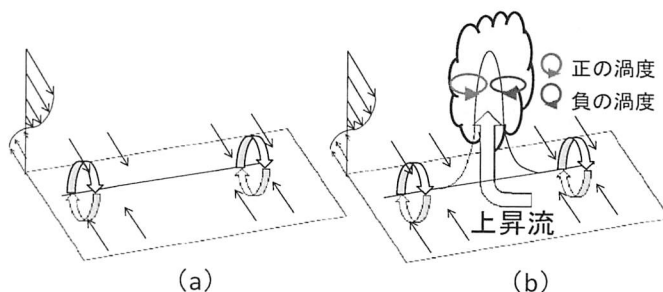


図9 鉛直渦管形成の模式図^{3), 7)}。(a) 水平風の鉛直シアによって水平方向に軸を持つ渦が形成される。(b) 上昇流があると水平渦が持ち上げられて上昇流の両脇に正負の渦度を持ったペアの鉛直渦管が形成される。

について述べる。

図9を今少し説明すると以下のようなものである。まず、(a)水平風の鉛直シアによって水平方向に軸を持つ渦が形成される。次に、(b)上昇流があると水平渦が持ち上げられて上昇流の両脇に正負の渦度を持ったペアの鉛直渦管が形成される。そもそも、このような生成過程が単独積乱雲の発生、発達過程でも見られるのではないかと考え、ゲリラ豪雨の危険性予測に鉛直渦度を用いた。結果その仮定に矛盾しない手法となった。

それでは、図9(b)のように正負の鉛直渦管が存在し発達して行くのだろうか？図10にその例を示す。レーダービーム操作面での鉛直渦度が高度、時間ごとに示されている。メッシュサイズは250m×250kmであるがスムージングを施している。ある程度広がりを持った正および負の鉛直渦度が鉛直方向に渦管のように連なっていることがわかる。タマゴの段階ではエコーが小さく渦管構造を確認することが不可能な事例が多いが、より後のステージでは、降水粒子の形成に伴いエコー域が鉛直に伸び、鉛直方向に伸びる渦管構造を確認することができる。2013年～2016年での28ゲリラ豪雨事例すべてでこのような正負の鉛直渦管が確認されている。

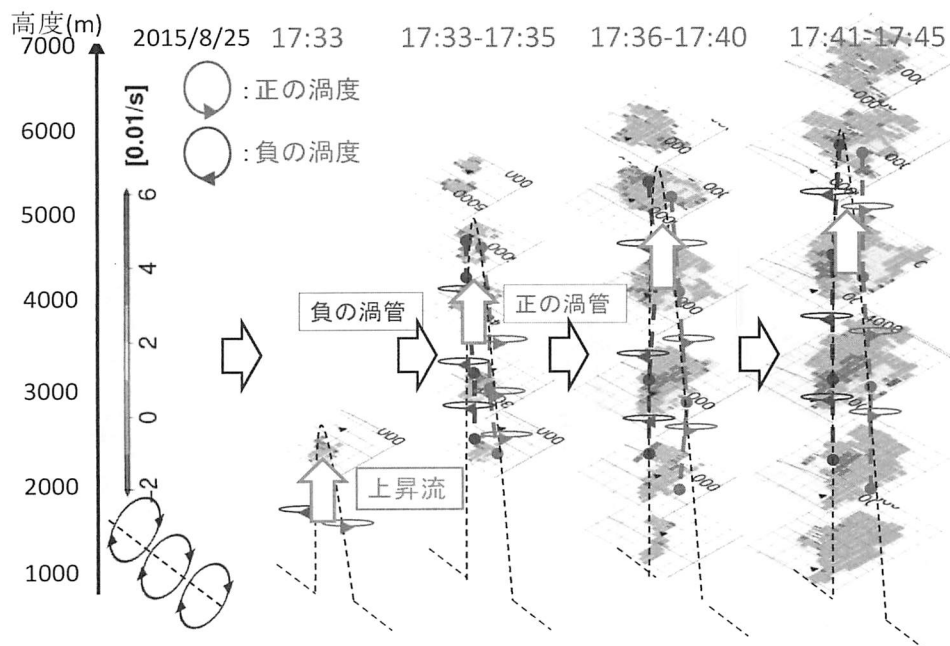


図10 確認した鉛直渦管構造の一例

3.2 鉛直渦管の振る舞いについての理論的考察

次に、理論的な考察を紹介する^{3), 7)}。図9に示したように、水平渦管が水平風の鉛直シアによって形成され、さらに上昇流によってねじ曲げられて正負の鉛直渦管が形成される様子を考える。鉛直渦管の動きは鉛直方向の渦度方程式、

$$\frac{d\zeta}{dt} = \xi \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \eta \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + \zeta \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2a)$$

で表現される。ここに、 ξ はx軸方向（図10の奥から手前方向）の渦度、 η はy軸方向（左から右方向）の渦度、 w はz軸方向（高さ方向）の速度（上昇流）である。右辺第1項、第2項は水平風速の鉛直シアによる水平渦管のねじれ、第3項は鉛直渦管の鉛直風速による伸縮を表している。図9(a)の段階では右辺は第2項以外0である。

さて、 $\partial u / \partial z \neq 0$ のときに鉛直渦度 $\zeta = 0$ となっている大気環境場では、上昇流 w によって水平渦管 η はねじら

れ始める．そうすると，式(2a)に示されるように，鉛直渦度 ζ が第2項によるねじれによって変化し始める．このとき，(2a)式は

$$\frac{d\zeta}{dt} = \eta \cdot \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{d\bar{u}(z)}{dz} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2b)$$

のようにかき直すことができる．ここで， $\bar{u}(z)$ は大気環境場の水平風速である．この式(2b)より，水平風速の鉛直シア方向の左手（ $\partial w / \partial y > 0$ ）では鉛直渦度 ζ は正，右手（ $\partial w / \partial y < 0$ ）では負となることがわかる．すなわち正負の渦度のペアが生成される．一旦正負の渦度が精製されると式(2a)右辺第3項（伸縮項）によってその絶対値がさらに大きくなる．すなわち，鉛直渦管が伸びるとともに強化されることを意味する．

3.3 鉛直渦管構造と上昇流位置の検証

3.3.1 Z_{DR} Column による上昇流の解析

Z_{DR} は水平・垂直偏波間の受信電力差を表す偏波パラメータである．融解層より高い領域での大きい Z_{DR} は上昇流の存在を示唆している¹³⁾．大きな雨滴などの扁平な粒子は大きな値を示し，小さな雨滴や雹，霰など扁平でなく円形に近い粒子は0に近い値を示す．融解層以上では通常 Z_{DR} の大きい粒子は存在しない．しかし上昇流により融解層より下から雨滴が運ばれると融解層以上でも大きな Z_{DR} を示すColumnの存在を確認することができる．

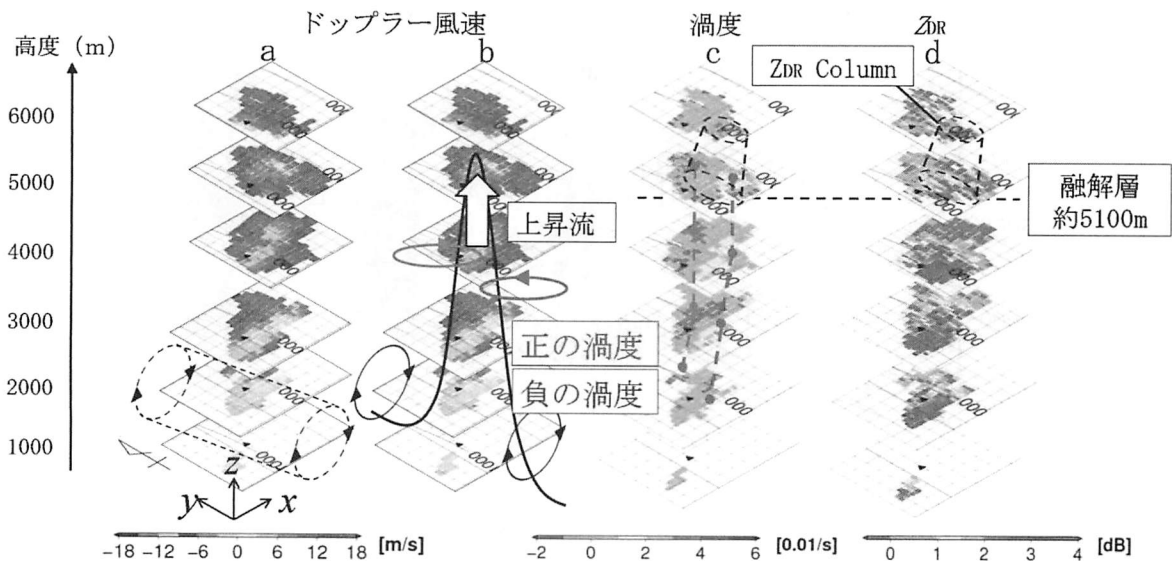


図11 ゲリラ豪雨事例における田口レーダーからの観測図．左からドップラー風速(a, b)、渦度(c)、 Z_{DR} (d)．渦度の図上に Z_{DR} Columnが見られた部分を点線で表現している^{3), 7)}．

これを用いて上昇流の位置の推定を行い，図11のような結果を得た．まず図11(a)，(b)に示したドップラー風速の高度分布から，図11(a)に示すような水平渦が形成されていたと考えられる．前述のように，鉛直方向の渦度方程式(2a)からこの水平渦管が上昇流によって立ち上げられると図11(b)に示した位置に正負の鉛直渦管と上昇流が存在するものと推測できる．すなわち，右側（この事例では南側）に正の渦度，左側（北側）に負の渦度を持った鉛直渦管が形成され，その中間に最も強い上昇流が存在すると推測できる．

そこで，渦度の推定値に着目すると図11(c)のようになっていた．正負の鉛直渦管が観測から推定され，南側で正の渦度，北側で負の渦度が確認できる．これは前述の上昇流と渦度の位置関係と一致している．すなわち，ゲリラ豪雨事例の鉛直渦管の形成される位置が3.2の理論的考察と矛盾しない．

次に上昇流の位置の検証を行う．図11 (d)にこの事例の Z_{DR} を示す．融解層以上の Z_{DR} に注目したところ，大きな値を持つ Z_{DR} Columnが存在することがわかる． Z_{DR} Columnの位置と理論から推定される上昇流の位置を比較したところ，上昇流と渦度に対応していることがわかる．

3.3.2 マルチドップラー解析による上昇流

つぎに，2台のレーダーによるドップラー解析から上昇流を推定し，3.3.1と矛盾がないか検証する³⁾．

ここでは，清水・前坂¹⁴⁾の三次元変分法を用いる解析手法を使用した．これは解析全領域同時に最適な風速場を推定する手法である．すなわち，最小にすべき評価関数を J とすると， J を最小とするような風速 u ， v ， w の組み合わせを求める手法である． J は式(3b)，(3c)でそれぞれ表される2つの評価関数の総和である． J_o ， J_d はそれぞれドップラー風速の観測誤差，連続式の誤差である．ただし， m はレーダー番号， i ， j ， k はそれぞれ x ， y ， z 座標方向の格子番号， Vr_m はドップラー風速の観測値， wl は降水粒子の落下速度， $\cos A$ ， $\cos B$ ， $\cos C$ はレーダ位置からの方向余弦， $\bar{\rho}$ は平均大気密度， λ_o ， λ_d はそれぞれ誤差分散の逆数である；

$$J = J_o + J_d, \quad (3a)$$

$$J_o = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k,m} \lambda_o (Vr_m - u \cos A - v \cos B - (w + wl) \cos C)^2, \quad (3b)$$

$$J_d = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} \lambda_d D^2, \quad (3c)$$

$$D = \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z}. \quad (3d)$$

マルチドップラー解析は Z_{DR} 解析と比較して推定値の時空間分解能が実質粗く，加えて，複数のレーダーでエコーが捉えられてからでないと上昇流を計算できない．しかし Z_{DR} 解析は0度層より高い部分までエコー頂が発達しないと上昇流部を推定できない点を大いに補う．

図12に，図11と同じ事例のゲリラ豪雨に対する上昇流の推測結果を示す．上昇流の図だけ，これまでのレ

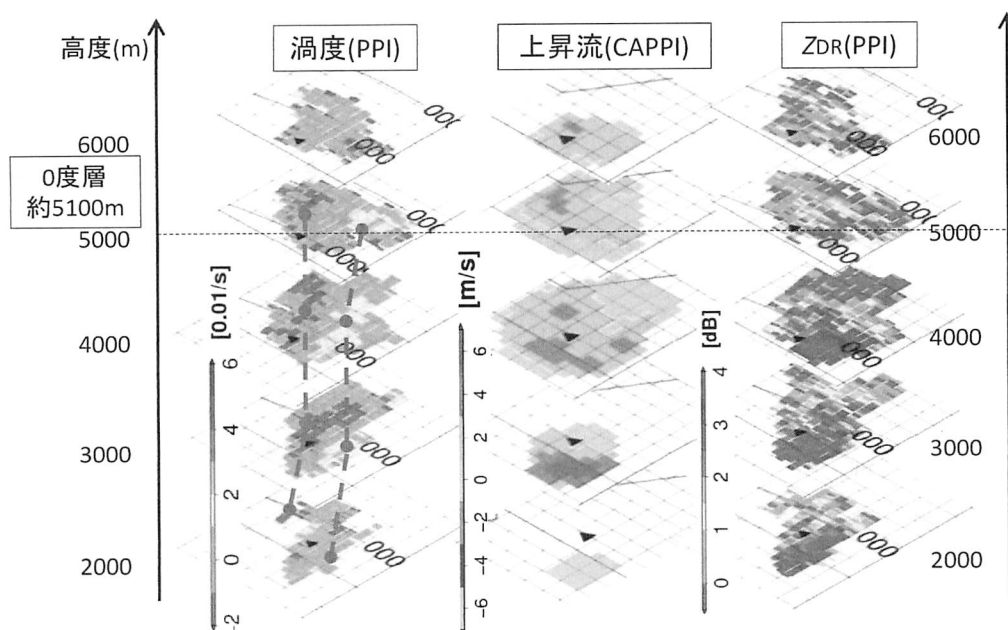


図12 ゲリラ豪雨事例（図11）に対してデュアルドップラー解析から推定された上昇流．左から渦度・正負の渦管

ーダービーム操作面 (PPI) ではなく、等高度面 (CAPPI) 上の表示になっている。なめらかな水平分布となっているものの、ほぼ正負の渦管の間に上昇流が存在すること、それが融解層以上の Z_{DR} Columnの位置とも矛盾しないことが検証できている。

尚、マルチセルやスーパーセルになるときは、水平風速は方向も含めて鉛直シアがある。しかし、単シングルセル (独積乱雲) では高さ方向に風向があまり変化しないこともVAD法¹⁴⁾と呼ばれるドップラー解析から確認している。

4 より早期の探知とその渦管構造解析

4.1 Kaバンド (雲) レーダーによる解析

Cバンドレーダー、Xバンドレーダーの電波波長が約5cm, 3cmであるのに対して、Kaバンドレーダーはmmオーダーの波長を持ち、数10ミクロンの粒径をもつ雲粒子に対しても感度がある。そのため、前者は降水レーダー、後者は雲レーダーと呼ばれる。図13に示すように、Kaバンドレーダーはより

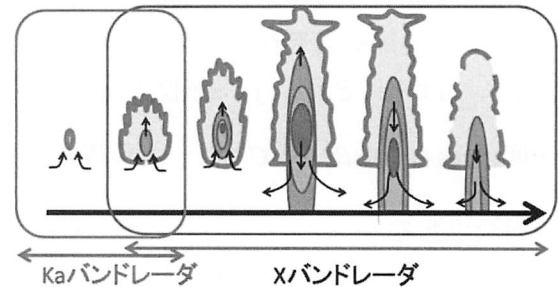


図13 Kaバンドレーダー、Xバンドレーダーの役割

早期に、タマゴを探知でき危険性を判断できる可能性があり、Xバンドレーダーとの同時観測、解析により以下のような結果が得られている。

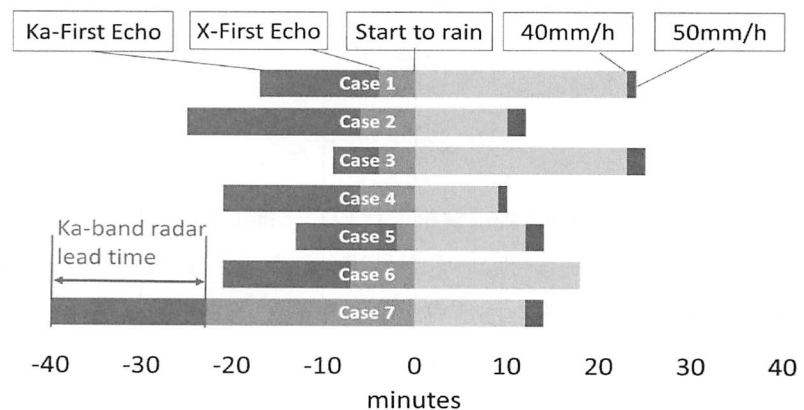


図14 Kaバンドレーダー、Xバンドレーダーそれぞれによるファーストエコー探知のタイミングの比較¹⁵⁾。

まず、図14は Kaバンドレーダー、Xバンドレーダーそれぞれによるファーストエコー探知のタイミングを比較したもので、Kaバンドレーダーは10分間隔、Xバンドレーダーは5分間隔の観測であるにもかかわらず、KaバンドレーダーはXバンドレーダーより約20分早くタマゴを早期探知できている。一方、図15はKaバンドレーダーによって解析された鉛直渦度である。これまでの理論的推測を裏付けるごとく、低層における積乱雲初期でも正負の鉛直渦管が存在していることを示している。

4.2 LES モデルによる解析

観測情報の解析だけではなく、Large Eddy Simulation (LES)モデルを独自開発し雲物理モデルと結合させることによって、積乱雲の発生からタマゴの形成、さらにはその後の発達過程を数値計算によってシミュレートすることができる。図16は上昇流が大気境界層を超えて雲が生成されだしたタイミングの数値計算結果である¹⁶⁾。濃ピンク色で示されている渦管が

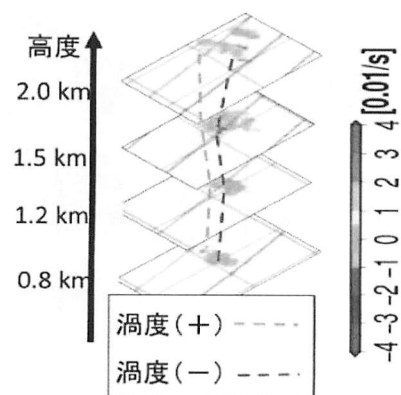


図15 Kaバンドレーダーによる正負鉛直渦管¹⁵⁾

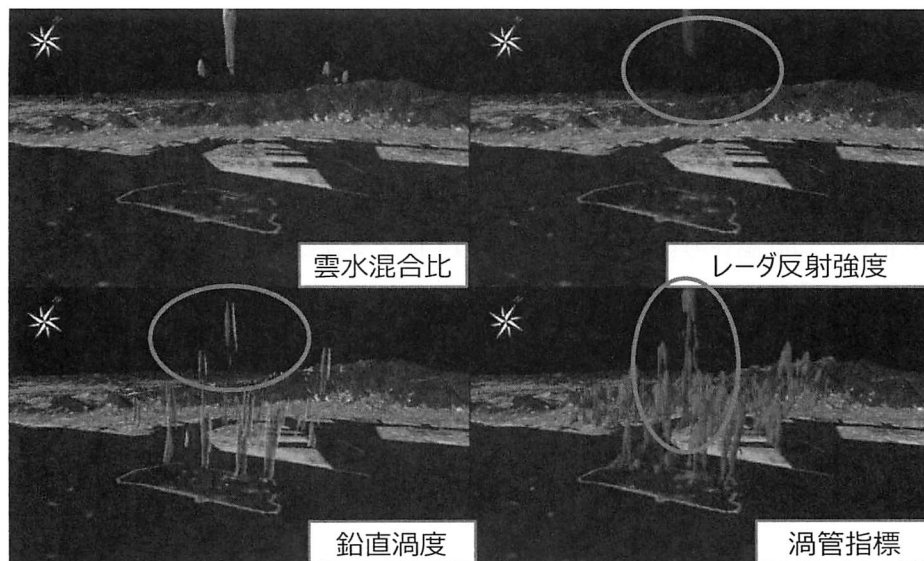


図16 LESモデルによる数値計算によって算出された、雲水混合比、レーダーエコー、鉛直渦度、渦管¹⁶⁾。



図17 マルチ周波数レーダー群による集中観測

立ち上がって上空に伸びている様子、その渦管には正負の渦度がペアとして存在している様子が読み取れ、これまでの理論的考察、レーダー解析結果をサポートする結果となっている。

4.3 マルチ周波数レーダー群による集中観測

本紙第29巻第7号¹⁾で述べたように、2007年からCバンド偏波ドップラーレーダーと降水粒子を雲中で捉えるビデオゾンデの同期集中観測を継続して実施してきている。2016年からは、加えてXならびKaバンド偏波ドップラーレーダー、気流を観測するライダー、ビデオゾンデに加えて雲粒子を直接観測する測器による同期観測をスタートさせている。一方、2012年からは神戸市においてXならびKaバンド偏波ドップラーレーダー、ライダーによる集中観測を開始し、現在では、加えてXバンドフェーズドアレイドップラーレーダー、新たに導入した境界層レーダーによって、境界層内での渦管構造の発生成やその後の発達過程と雲粒子観測を実施している。

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、降水レーダー、雲レーダー等による観測とLESモデルによる数値計算によって進めているメカニズム解明を紹介した。特に、積乱雲の中に存在する正負の鉛直渦管の存在が重要で、その生成・発達に対する理論的考察の正しさを紹介した。今後は、積乱雲の元となる上昇流の境界層内での生起に山岳、都市の熱的環境、ビル群物理形態が及ぼす影響や、その初期から成熟期への渦管構造の消長をより明らかにして行き、実践手法にも結びつけて行きたいと考えている。

本稿は、雑誌「ながれ」に投稿した内容¹⁷⁾を再掲することによりテキストとした。

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.
- 10) Nakagawa, K., M. Katayama, A. Masuda, H. Hanado, M. Kubota, K. Zettsu, and E. Nakakita, Development of the decision support system for the localized torrential rainfall using the phased array weather radar, Abstracts of 2017 International Symposium on Weather Radar and Hydrology, RN-07, 2017.
- 11) Cotton, W. R., R. A. Anthes, Storm and cloud dynamics, International Geophysics Series, Vol.44, Academic press, pp.883, 1989.
- 12) Klemp, J. B., Dynamics of Tornadic Thunderstorm. *Ann. Rev. Fluid Mech*, 19, pp.369-402, 1987.

- 13) Adachi, A., T. Kobayashi, H. Yamaguchi and S. Onogi, Detection of potentially hazardous convective clouds with a dual-polarized C-band radar, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(10), pp. 2741-2760, 2013.
- 14) 清水慎吾, 前坂剛, 三次元風速場の推定のための変分法を用いた複数台ドップラーレーダデータの解析手法, 防災科学技術研究所研究報告, 70, pp.1-8, 2007.
- 15) 中北英一, 新保友啓, 佐藤悠人, 山口弘誠, 大東忠保, Ka バンドレーダーを利用した積乱雲生成段階に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 74 巻, No.4, 2018 (印刷中).
- 16) 山口弘誠, 高見和弥, 井上 実, 中北英一, 豪雨の「種」を捉えるための都市効果を考慮する LES 気象モデルの開発, 土木学会論文集, B1(水工学), 第 72 巻, No.4, pp.205-210, 2016.
- 17) 中北英一, グリラ豪雨の早期探知・危険性予測とメカニズム解明、特集[集中豪雨・浸水氾濫]、ながれ、Vol.37, pp.3-10, 2018.