

ゲリラ豪雨危険性予知手法の高精度化に向けた 積乱雲生成時の渦管構造の解析

Structural Analysis of Vortex Tubes in a Cumulonimbus Cloud at Its Developing Stage toward an Improvement of the Risk Prediction Method of Guerilla-Heavy Rainfall

中北英一・佐藤悠人⁽¹⁾・西脇隆太⁽²⁾・山口弘誠

Eiichi NAKAKITA, Hiroto SATO⁽¹⁾, Ryuta NISHIWAKI⁽²⁾, and Kosei YAMAGUCHI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) 住友重機械工業株式会社

(1)Kyoto University, Graduate School of Engineering

(2)Sumitomo Heavy Industry, Ltd.

Synopsis

Today, frequency of Guerilla-heavy rainfall are increased in Japan. Nakakita et al. (2013) developed the risk prediction system with the vertical vorticity information in a convective cell at its first stage (hereafter, baby-cell). For more accurate system, we tried to understand how a cell develops to heavy rainfall by analyzing the structure of vortex tubes inside baby-cells. Vortex tubes are observed inside all sample cells with X-MP Doppler radar in Kansai area. For more detailed analysis, we are challenging to analyze vortex tubes with phased array radar in Osaka University.

キーワード: ゲリラ豪雨, 積乱雲のタマゴ, 渦度, 渦管, フェーズドアレイレーダ

Keywords: Guerilla-heavy rainfall, baby-cell, vorticity, vortex tube, phased array radar

1. はじめに

1.1 研究背景

昨今, 都市域での集中豪雨災害が研究者の間のみならず, 世間でも注目を集めている。2014年8月は台風, 前線及び, 暖湿流が原因の豪雨が多発し, 京都府福知山市では, 浸水家屋が床上床下合わせて約 2,500 棟という被害をもたらした洪水が起こり, 広島県広島市

で 74 名の死者を出した大規模な土砂災害が起こった。災害を引き起こす豪雨には, 様々なスケールが存在する。竜巻, 積乱雲, 集中豪雨, 梅雨前線, 台風と順にスケールが大きくなり, もたらされる災害にも違いがある。極めて小さな時間, 空間スケールで発生・発達する豪雨を局地的豪雨と呼び, 特に人命に関わる局地的豪雨はゲリラ豪雨と表現される。2008年7月兵庫県都賀川において, ゲリラ豪

雨による突然の出水で約 50 名が流され、5 名の尊い命が奪われるという水難事故が発生した。市民の憩いの場であった都賀川が、わずか 10 分足らずで悲惨な事故現場となった。このような災害が起こった要因として、都市域特有の水環境が挙げられる。都賀川の場合、豪雨域が河川上流に重なったことに加え、都市域に降った雨が効率よく下水道システムを経て、河川に大量の横流入をもたらした。また、都賀川は普段から、親水空間としての役割も果たしており、事故当時も多くの人々が川辺で遊んでいたことも要因の 1 つである。このような悲惨な事故が 2 度と起こらぬよう、1 分 1 秒でも早い注意喚起を行い、人々を安全に避難させる必要がある。そのために、ゲリラ豪雨の予測技術の確立、高精度化がより一層急務であると言える。

1.2 研究目的

中北ら (2013) は、積乱雲内部の渦度を利用した積乱雲の発達危険性予測手法を開発し、すでに国土交通省で試験的運用がなされている。しかし、なぜ渦度のある積乱雲が発生するのか、またどのような渦構造を経て発達するのか、そのメカニズムについては未だに明らかでない点が多い。渦度が積乱雲の発生、発達にどのように関わっているのかというメカニズムを解明することで、最終的には渦度の値の大きさのみならず、渦度が観測された時刻、高度等も危険性予測情報として実践的に利用して、危険性予測の精度を向上させることができると考えられる。本研究では、タマゴ発生、発達時におけるメカニズムの解明を目指し、積乱雲初期のふるまいを詳細に解析し、新たな知見を得ることを目的と定めた。解析には積乱雲が実際に持つ数値に近い値を利用する必要があり、本研究では座標変換や補間によって数値に誤差が生じないように注意してデータ処理を行う。また発生、発達過程をより細かい時空間分解能で解析するため、近畿地方の X バンド MP レーダネットワークに加え、2012 年に大阪大学に設置されたフェースドアレイレーダを用いて渦度の分布解析を行う。

2. ゲリラ豪雨の特徴

2.1 ゲリラ豪雨をもたらす積乱雲について

本節では、ゲリラ豪雨の発達、衰退過程について図を交えて説明する。Fig.1 に単独積乱雲の発達、衰退過程を概念的に示す (白石 (2009))。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。①では、湿った空気が上昇し、凝結することで雲粒になる。雲粒はセンチメートル波を用いる X バンド MP レーダ、フェースドアレイレーダ等では探知できない。②では、積乱雲内で上昇流が発達し水蒸気が凝結し始め、降水粒子が形成される。降水粒子の大きさは直径 0.1~数 mm であり、この段階になり初めてセンチメートル波レーダで探知できる。中北ら (2008) が初めて用いたように、レーダで探知可能となり上空で捉えたエコーを「ゲリラ豪雨のタマゴ」と呼ぶこととする。この段階ではまだ地上に降水はもたらされない。③、④でタマゴは上昇し、上空に降水粒子を蓄えながら発達する。この時、水蒸気の凝結熱による加熱が上昇流の加速に大きく寄与することがわかっている (例えば新野ら (2001))。やがて地上で弱い降水が始まり、降水粒子発生から 30 分程度経過し成熟期になると積乱雲は④、⑤のように雲頂高度が圏界面に達するほどに成長する。雲内部で十分に蓄えられた降水粒子を上昇流で支えられなくなり、その結果、降水粒子は落下し降水に伴い中層から下降流が始まる。この時、雲の上層部はまだ上昇流であるから、成熟期では上昇流と下降流が混在した状態である。その後地上で豪雨をもたらす。最後の⑥の段階では、衰退期に至り、上昇気流、下降気流ともに弱くなり降水も弱まる。

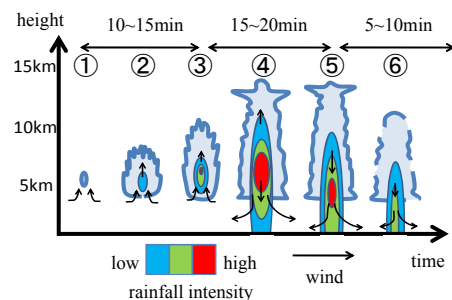


Fig.1 The growth process of the cumulonimbus causing a localized heavy rainfall

2.2 早期探知と危険性予測手法

中北ら (2011b) は, X バンド MP レーダの立体観測を用いて, タマゴを上空で早期に探知するという研究を行った. その結果, 地上付近での探知より最大で 12 分も早くタマゴを探知できたという結果を得た. たかが 10 分程度の時間ではあるが, タイムスケールが小さいゲリラ豪雨において, 10 分というリードタイム確保は人命を救うという意味で極めて重要である. この研究結果は立体観測がゲリラ豪雨の早期発見において有効であることを示した. さらに, 中北ら (2011a) は渦度を用いた危険性予測の研究を行い, ゲリラ豪雨をもたらすタマゴは大きい渦度を持つことを発見した. 中北ら (2013) は「早期探知」, 「自動追跡」及び「危険性の予測」の 3 手法を組み合わせ, ゲリラ豪雨災害危険地域を予測する予報システムを開発した. Fig. 2 は渦度がタマゴ探知から何分後に検出されているか, タマゴ探知から何分後に地上で最大降雨強度に至るかという統計情報を表している. 図は中北ら (2013) が行った先行研究の手法に従い, 事例を追加して作成した. また同一事例で, 渦発生から何分後に最大降雨強度に至るかという統計情報を作成した (Fig.3). すべての発達事例において, 最大降雨強度に至る前に高い渦度が検出された. また, 35 個の発達事例中 33 個でタマゴ探知時刻から 5 分以内に高い渦度が検出された. この統計により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示されている. しかし繰り返し述べるが, なぜ, どのようにして高い渦度を持つタマゴが発達するのか, そのメカニズムは解明されていない. また, 危険性予測はある程度高い精度でタマゴが発達するか予測することが可能であるが, 依然として危険性予測の「空振り」という課題が残されている. ここで, 危険視したタマゴが発達しない事例を「空振り」と呼び, 逆に危険視しなかったタマゴが発達する事例を「見逃し」と呼ぶ. 防災の観点上, 「見逃し」に関しては絶対に防ぐ必要があり, 中北ら (2013) の危険性予測システムは现阶段でこの課題をクリアしている. しかし, 「空振り」に関しては改善の余地がある. また, 危険性予測システムは渦度による危険性の定性的予測を可能としているが, 降雨強度の定量的予測を行っていない. 渦度による本研究では, 最終的な目的として危険性

予測の精度向上を掲げるが, 一端実践から理論に立ち返り, 渦のあるタマゴの発生・発達のメカニズムに関する解析を行った. また, スーパーセル等のスケールの大きい積乱雲の渦の研究は行われている (例えば Rotunno, R. (1981)) もの, 本研究で扱うようなゲリラ豪雨をもたらすようなスケールの小さい積乱雲の発生, 発達過程の渦に関する既往研究はほとんどない. 本研究はタマゴ発生時の渦度の大きさ, 発達時の空間分布について新たな知見を得ることで, 「空振り」の削減, 予測の早期化, 危険性予測の定量化の実現を目指すものである.

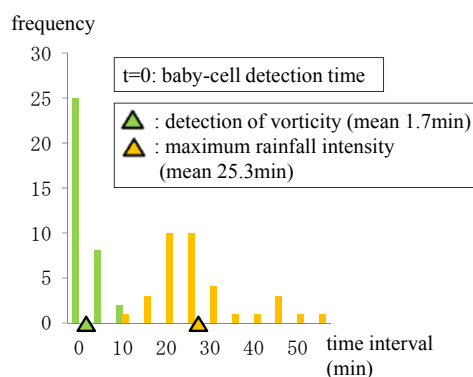


Fig. 2 Yellow-green line; interval of time between detection of baby-cell and vorticity. Orange line; interval of time between detection of baby-cell, and maximum rainfall intensity at the ground

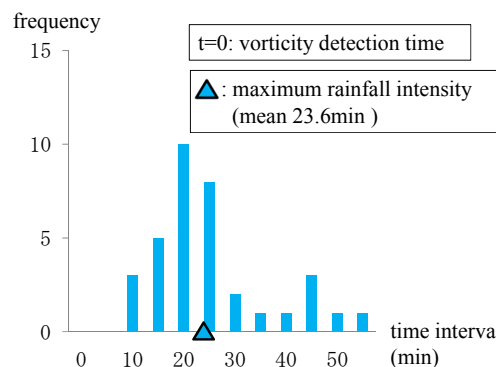


Fig. 3 Interval of time between detection of vorticity and maximum rainfall intensity at the ground

3. XバンドMPレーダとフェーズドアレイレーダ

3.1 レーダの特徴

(1) 京阪神のXバンドMPレーダ

本研究では、国土交通省が管理する京阪神エリアのXバンドMPレーダを解析に用いる。XバンドMPレーダは、一般の気象レーダのアンテナと同様に機械的に3次元全体をスキャンすることが可能であり、必要に応じて特定の方位方向をスキャンする。3次元の立体的なエコーを観測する際は一定仰角で方位方向に全周スキャンするPPI(Plan Position Indicator)スキャンを行い、仰角を変えながら5分に一回の立体観測(ボリュームスキャン)を行っている。近畿地方ではゲリラ豪雨の早期探知も運用目的のひとつとして、時間的により密な観測を行うために観測ネットワークを構成するXRAIN(X-band polarimetric RAdar Information Network)を構築している。

(2) フェーズドアレイレーダについて

2012年5月に大阪大学吹田キャンパス屋上にフェーズドアレイレーダが設置され、試験的な観測がなされている(平野ら(2014))。フェーズドアレイレーダはゲリラ豪雨や竜巻等の局地的な気象災害を対象とし、短時間で詳細な3次元情報を得ることができる。従来まではパラボラ型アンテナ気象レーダは機械走査により仰角を変えて観測する方法がとられていたが、フェーズドアレイレーダは電子走査による高速スキャンを実現した。これにより30秒に一回のボリュームスキャンが可能となっている。

3.2 レーダデータの処理

(1) ノイズの処理

また、中北ら(2013)の先行研究では、降水域の定義を「20dBZ以上の反射強度で0.5km²以上の面積を持つ閉曲面」とし、反射強度20dBZを閾値に設定し、20dBZ以下の値を持つメッシュでの渦度を無効値として扱っている。しかし本研究では反射強度が弱いより初期段階のタマゴ解析を重視するため、XバンドMPレーダデータは反射強度に関しては5dBZのノイズ除去を施し、ドップラー風速と渦度に関しては反射強度によるノイズ除去を施さなかった。フェーズドアレイレーダデータに関しては0,1,5,10dBZでノイズ除去

を行い、その結果を比較したところ可視化した図の見やすさとタマゴの早期探知の観点から1dBZが最適であるとした。ゆえに反射強度1dBZを閾値として、反射強度、ドップラー風速、渦度のノイズ除去を行った。

(2) データの可視化

レーダ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。まず、中北ら(2013)の可視化手法について述べる。中北ら(2013)は解析の簡便性から、始めに単位放射メッシュ毎に得られる値を3次元デカルト直交座標系における格子点上の値に変換している。変換の際、水平方向200m×200m、鉛直方向200mの格子を考え、レーダビームが通過していない格子点には鉛直内挿補間で値を挿入する。こうして等高度面データ

(CAPPI=Constant Altitude Plan Positioning

Indicator)を作成し、高度毎のドップラー風速と反射強度の平面分布を求める。また反射強度に関しては、平滑化を行い、水平方向500m×500m、鉛直方向250mの格子点データに変換している。各XバンドMPレーダは5分で1サイクルの立体観測を行っていることから、5分間隔の出力時刻を定めている。その際、1サイクル終了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、ドップラー風速の観測値が瞬時に得られるものと見なしている。これは防災の観点上、時間に余裕を持たせて探知を行うためである。

本研究では、CAPPIデータを作成するのではなく、各PPIスキャンによって得られたデータを補間せずに2次元直交座標系に投影し、可視化を行った。また、5分間隔のデータは実際の時刻と異なるデータが合成されているので、XバンドMPレーダに関しては1分間隔の出力時刻を設定した。一方でフェーズドアレイレーダは30秒に一度立体観測を行っているので30秒間隔の出力時刻を設定した。極座標系レーダデータを2次元直交座標系に変換する際、サンプリングボリュームが格子を十分な数含み、正確な極座標系のデータを表現できるようにするため水平方向に50m×50mの格子点に投影した。また高度の等値線を設けた。

(3) 渦度の計算手法

本研究では、中北ら(2011a)の先行研究と同様にドップラー風速から渦度を算出し、解

析を行った．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，鉛直渦度の定義式は，

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

と表せる．ドップラー風速の観測で得られるのは，動径方向の風速のみであり，式（1）の右辺項の一方の情報しか得ることができない．ここで，渦が Fig. 4 のように存在すると仮定すると，渦度は 2 地点の動径方向の風速差を 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．中北ら（2011a）の先行研究では，定性的な評価を重視していたため，最後の 2 倍する作業を行っていないが，本研究では定義式に従い 2 倍して，正確に表現した．

$$\zeta = 2 \times \frac{v_a - v_b}{2r} \quad (2)$$

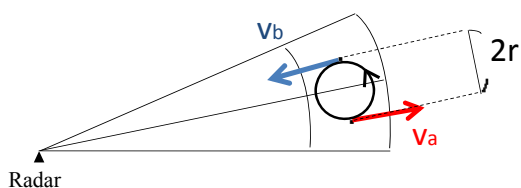


Fig. 4 Vorticity is calculated by Doppler velocity, v_a and v_b

先行研究では，防災の観点上，より危険側に予測を行うため，4 台のレーダで別々に渦度を計算した後，格子毎に 4 台の最大値を出

力して図化している．そして，積乱雲内部で最も高い渦度の値を危険性予知に利用している．しかし，本研究では，メカニズム解明の観点上，最大値出力を行わず，各レーダそれぞれの渦度のデータを解析に用いた．これにより，より正確な渦度の分布を解析することが可能となり，また最大値出力では見ることができなかった負の渦度も解析することができる．解析図の例を Fig. 5 に示す．

4. 積乱雲の渦管構造解析

4.1 解析手法

(1) 事例の抽出方法

2013,2014 年 8 月の地上での降雨強度分布を目視で確認し，解析事例を抽出した．前章で述べたように XRAIN により 1 分間毎，250m×250m メッシュの地上での降雨強度のデータを得ることができる．事例の抽出条件は，「突如出現し，地上で 0.1mm/h 以上の降雨強度が確認されてから 30 分以内に 50mm/h 以上の降雨強度をもたらした」積乱雲であると定めた．Table 1 に抽出した 16 事例をまとめた．

(2) 解析における着眼点

本研究では正確な渦構造を解析する必要がある．タマゴのスケールは直径約数百 m 程度と非常に小さく，レーダから距離が離れると感度の影響で探知が遅れてしまう可能性があるため，できるだけ発生直後の渦管情報を解析するために各タマゴの発生場所に近いレーダを解析に用いた．先述した 16 事例について，渦度発見時のタマゴ内のすべての渦度の値と

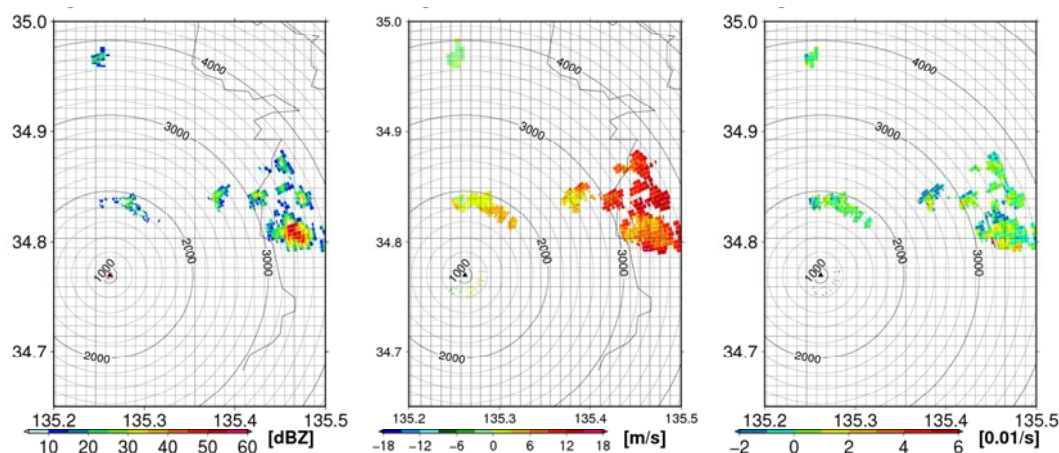


Fig. 5 These are observed by Rokko radar. Left; reflection intensity, middle; Doppler velocity, right; vorticity (2014/8/24 12:40, elevation07)

高度を確認した。本研究では、できるだけ早期にタマゴの存在を認知し、解析を行うために反射強度、ドップラー風速のいずれかで、エコーを認めた時刻をタマゴ発見時刻とした。ゆえに、タマゴ発見時刻であっても反射強度（或いはドップラー風速）のいずれかでしか探知されない場合が存在する。セルが途中で結合した事例を除く9事例については以下の項目に着目して詳細な解析を行った。①タマゴの発生が確認されてから10分間における各時刻各レーダのPPIスキャン毎の渦度の最大値と最小値、②タマゴの鉛直長さ時刻、③渦管の鉛直長さ位置、④渦度と反射強度の相関性、⑤レーダからタマゴの距離、である。これら5つの項目を整理したフォーマットを「ゲリラ豪雨の渦カルテ」と呼ぶこととする。項目について詳細な定義を設けたので、以下に記す。

①タマゴの発生が確認されてから10分間における各時刻各レーダのPPIスキャン毎の渦度の最大値と最小値

前章で述べたように、中北ら(2013)の危険性予測では渦度の最大値出力により予測を行っていた。本研究では、渦度の最大値の時間推移を確認するため、5分間隔ではなく、より細かい1分間隔で渦度のデータを扱った。また負の値も確認することで、正の値との対応を確認した。タマゴ発見時刻を確定し、その後10分間、各時刻におけるPPIスキャンデータ毎の渦度の最大値と最小値を記録した。データをとる際、異常に大きい、または小さい渦度が存在したので、本研究ではそれらをノイズと見なし以下のように処理を施した。

タマゴ発生から10分間におけるPPIスキャンデータの渦度の最大値、最小値に関しては、異常値が観測されたデータを除去し、統計に反映した。しかし、渦度発見時の渦度は各事例につき、1つしか得ることができないので、異常値を除いた中での最大値、最小値を確認した。本研究では異常値の閾値は正の渦度を0.07[s]、負の渦度を-0.07[s]と設定した。

②タマゴの鉛直長さ時刻

タマゴ発見時刻から20分間において、タマゴの鉛直長さを確認した。Fig. 6にタマゴの鉛直長さを決定する手法を示す。タマゴ(a)、(b)ともにレーダ(A)の近くで発生したので、レーダ(A)を用いて解析を行うこととする。タマゴ(b)の最高高度はレーダ(A)の観測範囲内に収まっているので、その時までの観測で得られた鉛直長さと、最も高い仰角が観測された時刻を記録した。タマゴの最高高度が最大仰角時の観測高度より高いとき、最大仰角観測時刻とその時までの観測で得られた鉛直長さを記録した。この時、レーダ(A)の観測だけでは、タマゴの最高高度を把握できないので、他のレーダ(B)を用いて、最高高度を記録した。

③渦管の鉛直長さ位置

本研究では渦度0.01[s]以上ならば正の大きい渦度、-0.01[s]以下ならば負の大きい渦度と定義した。すなわち、本研究では-0.01[s]~0.01[s]の渦度は無視できる値として扱った。PPIスキャンデータを目視で比較し、大きい渦度分布がPPIスキャン毎の図において鉛直に連続して見られたとき、渦が鉛直につ

Table 1 Samples of Guerilla-heavy rainfall

Sample number	Date	Time of rainfall at the ground	Time of 50mm/h rainfall intensity	Time of maximum rainfall intensity	Maximum rainfall[mm/h]
1	2013/8/6	13:10	13:30	13:33	78.9
2	2013/8/6	13:45	14:03	14:05	80.8
3	2013/8/6	16:10	16:23	16:23	54.8
4	2013/8/7	16:45	16:58	17:10	87.8
5	2014/8/17	9:13	9:35	9:39	84.1
6	2014/8/17	12:09	12:21	12:23	62.5
7	2014/8/17	15:50	16:02	16:04	80.4
8	2014/8/18	16:04	16:15	16:18	65.6
9	2014/8/23	11:52	12:06	12:08	81.7
10	2014/8/23	11:53	12:01	12:05	76.2
11	2014/8/23	16:06	16:21	16:29	92.1
12	2014/8/23	16:34	16:55	16:57	54.5
13	2014/8/24	12:38	12:50	12:53	70.9
14	2014/8/25	12:26	12:45	12:49	71.7
15	2014/8/25	17:37	17:44	17:51	96.2
16	2014/8/27	16:38	17:01	17:13	117.4

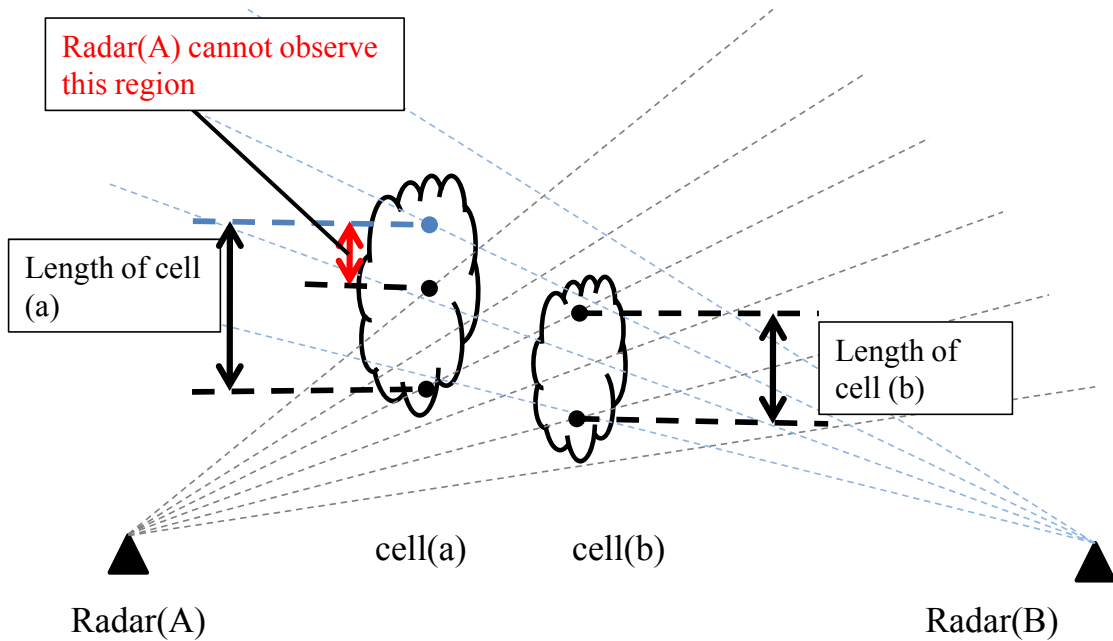


Fig. 6 The way to decide length of baby-cell

ながっているとして渦管の鉛直長さや高度を記録した。

④渦度と反射強度の相関性

正の渦管がある位置で高い反射強度が存在すれば降水粒子がではじめる時の上昇流が確認できると考えられるので、これについて着目した。

⑤レーダからタマゴの距離

初期の渦管のスケールは非常に小さく直径数百 m 程度であることから、レーダからタマゴまでの距離が大きいと、渦度を正確に捉えることができなないと考えた。ゆえに、タマゴからレーダまでの距離を記録し、距離毎に事例を区別した。タマゴは時間が経過するにつれて移動するので、②で発見から 10 分間における渦度の値を記録したので、その中間時刻にあたるタマゴ探知から 5 分後の距離を記録した。

4.2 タマゴの渦度解析

渦度の最大値と最小値の平均値はそれぞれ $0.0245[1/s]$ 、 $-0.0159[1/s]$ と正の渦度の方が絶対値で大きな値を示した。また、各 PPI スキャンの放射状メッシュ内の値をすべて目視で確認し、その渦度の頻度分布図を作成したところ Fig. 7 となった。頻度分布図から正の渦度の方が負の渦度の個数より多かった。これらの結果より、積乱雲初期の段階において、タ

マゴの正の渦度は負の渦度と比べ支配的であるものの、負の渦度も存在しているという結果を得た。

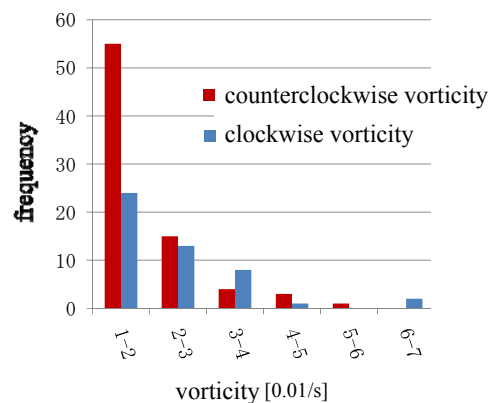


Fig. 7 The frequency of vorticity value in sample baby-cells

4.3 渦度の高度分布

事例毎にタマゴが発生して発達するまでにかかる時間は異なり、同じ時間間隔の高度分布を作成しても、事例毎に成長段階が異なると考えた。そこで、タマゴ発見時刻 T_{first} と地上降雨強度 50mm/h に至る時刻 $T_{50\text{mm}}$ の間隔 $\Delta T = T_{50\text{mm}} - T_{\text{first}}$ を用いて時間の正規化を施し、4 つのステージを設けた。ステージ別に作成した渦度の高度分布を Fig. 8 に示す。横軸に渦度、縦軸に高度をとり、各 PPI スキャンデー

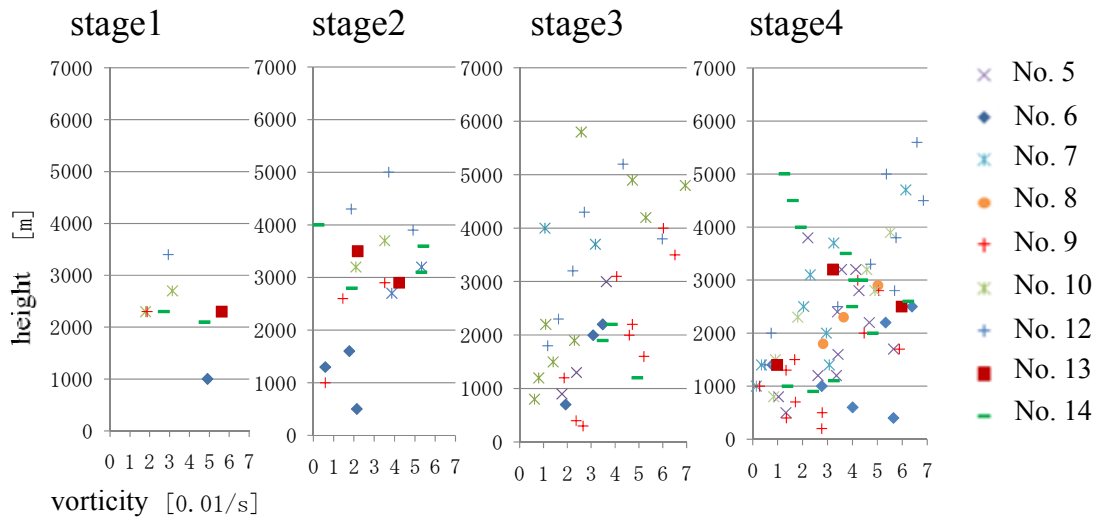


Fig. 8 Vorticity distribution with height at each stage

タの最大渦度をプロットした。この時事例毎の渦度が同一線上で確認しやすくなったので距離補正（詳細は付録に明記）を施した。ステージ1では2,000m付近の高度で渦度の高い部分（渦度のコア）が見られた。渦度のコアはステージ2では3,000~4,000mで、ステージ3,4では4,000~5,000mと、ステージを経る毎に上昇している様子が確認された。

4.4 渦管の確認と考察

(1) XバンドMPレーダを用いた渦管解析

渦管構造をより明確にするため、極座標系の渦度を移動平均して解析に用いた。タマゴ初期の段階では体積が小さく、渦管構造を捉えることができなかった。しかし、時間が経過したより後の段階では渦管が鉛直につながっている様子が確認できた。解析した9事例すべてにおいて渦管が観測され、その内7事例で渦管が鉛直に成長している様子が確認できた。また、6事例で正の渦管と負の渦管が隣り合って対になっている様子が確認できた。Fig. 9に正負ペアの渦管が成長している様子を示す。縦軸に高度をとり各時刻のPPIスキャンデータを縦に並べて、鉛直連続性をわかりやすくした。赤線は正の渦管、青線は負の渦管を表しており、黒線はエコーを表している。これにより時間と観測高度の関係が明らかになり、時間が進むにつれ渦管が成長している様子が確認できる。

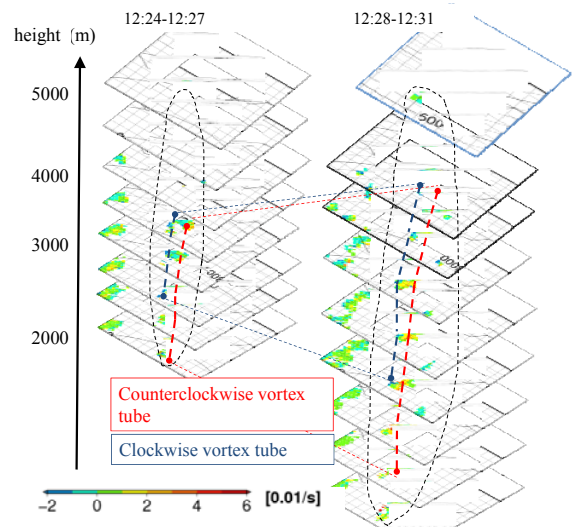


Fig. 9 Counterclockwise vortex tube and clockwise vortex tube exist inside the sample cell No.14

(2) フェーズドアレイレーダを用いた渦管解析

XバンドMPレーダで渦管を解析した結果、時空間的にレーダで捉えられなかった部分も多く、タマゴの発生、発達過程をすき間無く捉えているとは言えなかった。渦管解析を行った事例の中の1事例（事例14）についてフェーズドアレイレーダを用い、さらに時空間的に密な解析を行った。解析に用いた事例は六甲レーダ、田口レーダの2台のXバンドMPレーダで解析を行った事例である。Fig. 10は六甲レーダ、田口レーダで時空間的に観測できなかった渦管をフェーズドアレイレー

ダの観測で補うことができた様子を表している。図は縦軸に高度，横軸に時間をとり，各 PPI スキャンデータを整理したものである。赤線で X バンド MP レーダで得られた正の渦管の成長過程を表しており，緑線でフェーズドアレイレーダで得られた正の渦管を表している。これにより，タマゴ内部の渦管が徐々に鉛直方向に成長している様子を確認できる。

4.5 積乱雲発生・発達過程における渦解析のまとめ

本節では，ここまでの結果を整理する。積乱雲の発生段階における渦構造に関しては，ほとんど既往研究が無く，得られた結果は基本的に新たな知見である。一方で，スーパーセルに発達する積乱雲の発達，成熟段階の渦構造に関しては，既往研究（例えば Rotunno, R (1981)）でも示されており，本研究の結果と

の整合性を図りながらまとめる。

最大値，最小値の比較，及び，傾度分布の結果から，渦度発見時は正の渦度の方が値が大きく数も多いが，負の渦度も存在しているという結果を得た。これに対して二通りの考え方が得られる。一つは正負両方の渦度が混在している部分に強い上昇流が存在しているということである。もう一つは，初めはタマゴは正の渦度のみで構成されているが，レーダが観測するまでに時間がかかってしまい，タマゴに負の渦度が混ざり始めたということである。これにより，タマゴの中でも領域の小さいタマゴに限定したより詳細な解析が必要であると考えられる。

渦度の高度分布では渦度のコアが徐々に上昇していたことからタマゴ内部に上昇流が存在していることを示唆していると考えられる。

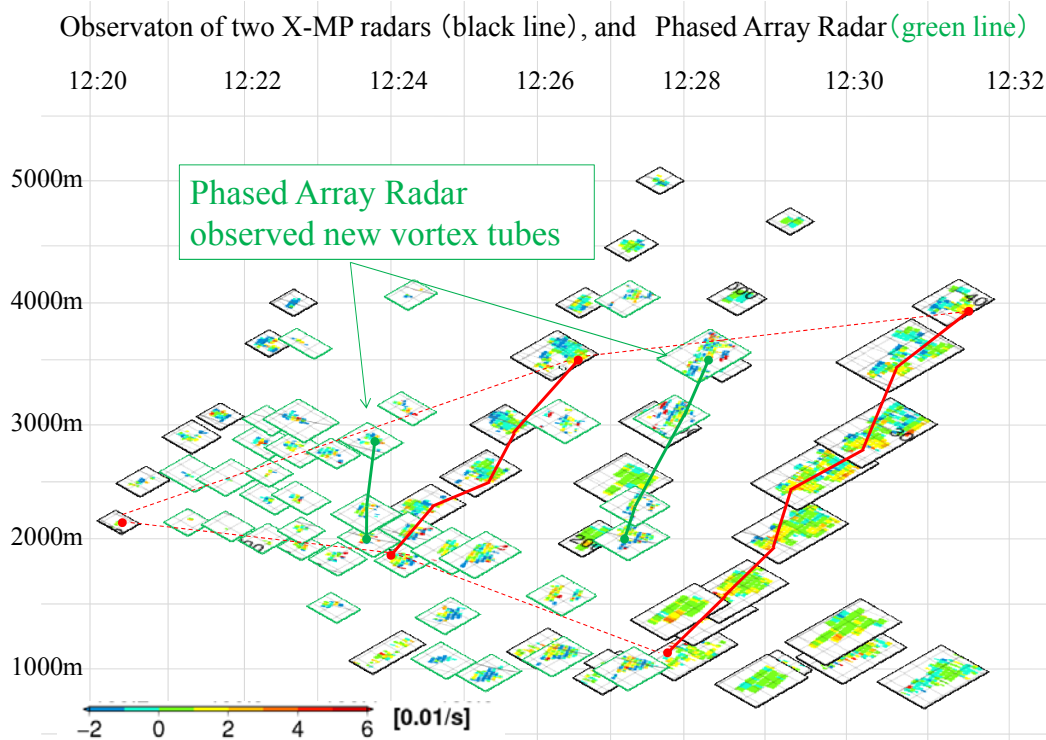


Fig. 10 Phased array radar observed gradual growth of vortex tube

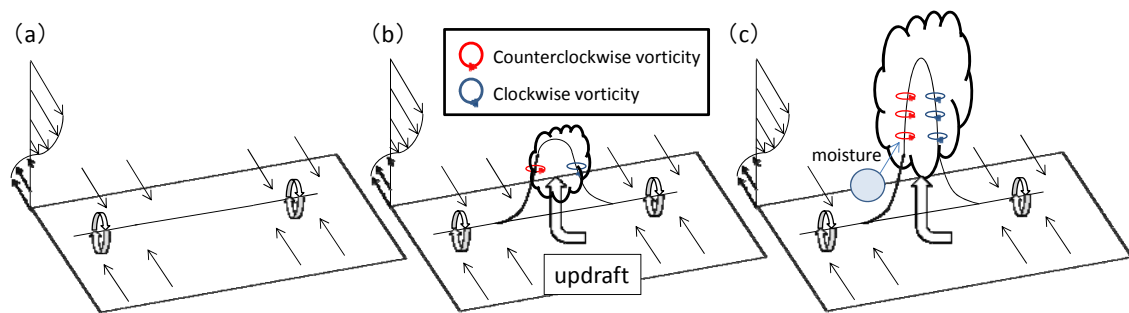


Fig. 11 The growth process of the supercell

スーパーセルに発達する積乱雲の成長過程 (たとえば Rotunno, R (1981), Wilhelmson, R.B., & Klemp, J.B. (1978)) を用いて渦管解析の結果を述べる. 大気には水平風の鉛直シアによって水平方向に軸を持つ水平渦が形成されていることがあり (Fig. 11 (a)), ここに積乱雲の形成に伴う上昇流が発生したとする. 上昇流が発生すると水平渦が持ち上げられて積乱雲内に正負両方の鉛直渦が形成される (Fig. 11 (b)). 積乱雲は渦によって回転しながら上昇し, 上空に水蒸気を蓄える. この時, 凝結熱によって上昇流を加速させ, さらに渦を強くするという正のフィードバック効果が生じる. 鉛直渦は上昇流によって持ち上げられ, 積乱雲内で正と負の渦管が並ぶ (Fig. 11 (c)). 解析の結果, サンプルである 9 事例すべてで渦管を確認することができ, 9 事例中 7 事例において渦管が鉛直に成長している様子を捉えることができた. また, 9 事例中 6 事例で正負両方の渦管がペアで捉えることができた. これらは, 先に述べたような上昇流によって水平渦が持ち上げられた過程と一致していた.

5. 結論

1. では, ゲリラ豪雨の危険性予知手法の必要性について述べ, 高精度化に必要であるゲリラ豪雨発生, 発達メカニズムの解明を目的として定めた.

2. では, 研究対象であるゲリラ豪雨の定義について述べ, 防災上におけるタマゴの研究の流れを述べた. 中北ら (2011b) が行ったゲリラ豪雨のタマゴの早期探知, 中北ら (2013) が行ったタマゴの危険性予測手法について述べ, 本研究の目的をより明確なものとした.

3. では, 解析に用いるレーダと, そのレーダから得られたデータの処理について述べた. 解析には, Xバンド MPレーダとフェーズドアレイレーダを用いたので, 両方のレーダの特徴を明確にし, 両レーダを用いる利点をそれぞれ述べた. 次に, レーダから得られたデータを可視化する際, 実際に積乱雲が持つ値により近い値を出力するための処理手法について述べた.

4. では, 渦度を用いた積乱雲の解析を発生段階のタマゴ, 発達段階の渦度, 組織化された渦管に分けて, 解析を行い, その結果を理論と比較しながら述べた. タマゴの段階では, 正負両方の渦度が存在しているという結果を得た. 渦度分布では, 事例毎に時間を正規化し, ステージを設定して解析を行い, 渦度のコアが上昇しているという結果を得た. 渦管解析では正負共にすべての事例で確認でき, 正負が対応したペアで見られた事例も存在したという結果を得た. これらを総括して渦度が上昇流と相関性があり, また, タマゴはスーパーセルに発達する積乱雲の過程と同様の渦管構造を持つと考えられる.

今後の課題として渦度とは異なる側面から現象を把握することも重要であると考えられる. 例えば Z_{DR} を用いて上昇流を推定する研究が行われており (たとえば A. Adachi et al. (2013), 増田・中北 (2014)), 今後は渦度に加えて解析に用いることで渦度と上昇流の関係を明らかにできると考えられる. そして, 最終的な目標は渦度の値のみならず, 高度, 時間ステージ, またはそれ以外の指標も用いて危険性予測の定量化を含む高精度化を実現することである.

以上をもって, 本研究の結論とする.

参考文献

- 中北英一・西脇隆太・山口弘誠（2011a）：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，京都大学防災研究所年報，第55号，B，pp. 319-329.
- 中北英一・西脇隆太・山口弘誠（2013）：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，京都大学防災研究所年報，第57号，pp.286-298.
- 中北英一・山口弘誠・山邊洋之（2008）：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，pp.547-562.
- 中北英一・山邊洋之・山口弘誠（2011b）：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，pp. 381-395.
- 新野宏・野田暁・柳瀬亘（2001）：大気の対流と渦の数値シミュレーション，pp. 141-152
- 平野裕基・円尾晃一・嶋村重治・吉田智・牛尾知雄・水谷文彦・佐藤晋介（2014）：気象用フェーズドアレイレーダの精度検証，電気学会論文誌，A(基礎・材料・共通部門誌)，No.4，pp. 204-210.
- 増田有俊・中北英一（2014）：偏波レーダ観測値を用いたZDR Columnの存在する孤立積乱雲の特徴解析，2014年度日本気象学会秋季大会，福岡，2014年10月21日～2013年10月23日.
- A. Adachi et al. (2013): Detection of potentially hazardous convective clouds with a dual-polarized C-band radar., Atmospheric Measurement Techniques 6.10, pp. 2741-2760.
- Rotunno, R. (1981): On the evolution of thunderstorm rotation., Monthly Weather Review, 109.3, pp. 577-586.
- Wilhelmson, R. B. and Klemp, J. B. (1978): A numerical study of storm splitting that leads to long-lived storms., Journal of the Atmospheric Sciences, 35(10), pp. 1974-1986.

(論文受理日：2015年6月11日)