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 ーズ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 ステムは現段階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

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,

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{1}$$

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.



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 カして図化している.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 の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.

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 るので,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タマゴの鉛直長さと時刻, ③渦管の鉛直長さと位置,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タマゴの鉛直長さと時刻

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 高度を記録した.

③渦管の鉛直長さと位置

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
--	-------	---	---------	----	----------------	----------

Samala much an	Data	Time of rainfall at the	Time of 50mm/h	Time of maximum	Maximum
Sample number	Date	ground	rainfall intensity	rainfall intensity	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と高度を 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き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[/s], -0.0159[/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.





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 $T_{\rm first}$ と地 上降雨強度 50mm/h に至る時刻 $T_{\rm 50mm}$ の間隔 $\Delta T=T_{\rm 50mm}$ - $T_{\rm first}$ 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,頻度分布の 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.



Observation of two X-MP radars (black line), and Phased Array Radar (green line)

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), Wihelmson, 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て き、正負が対応したペアで見られた事例もて 満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.

- 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)