

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

RESEARCH ON THE PROGNOSTIC RISK OF BABY CELL FOR GUERRILLA-HEAVY
RAINFALL CONSIDERING BY VORTICITY WITH DOPPLER VELOCITY

中北英一¹・西脇隆太²・山邊洋之³・山口弘誠⁴

Eiichi NAKAKITA, Ryuta NISHIWAKI, Hiroyuki YAMABE and Kosei YAMAGUCHI

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 東京電力株式会社 常陸那珂火力発電所土木グループ (〒319-1113 茨城県那珂郡東海村)

⁴正会員 博(工) 京都大学特定助教 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Localized torrential rainfall caused heavy rainfall disasters in Summer and Baiu season of Japan called as “Guerrilla-heavy-rainfall” in Japanese media. The rainfall was produced by an isolated cumulonimbus that grew rapidly. To prevent these disasters, Japanese government recently installed networks of X-band polarimetric Doppler radars over major urban areas in Japan. X-band radar is suitable to realize earlier and more detailed detection of the baby cell, because X-band radar has higher sensitivity and spatial resolution. This research investigates the growth of the baby rain cell to become large cumulative clouds by focusing on its vorticity using Doppler velocity. In this research, we define two vortexes with different size, and evaluate a relationship qualitatively between rainfall and the existence of vortex.

Key Words : *Guerrilla-heavy-rainfall, baby cell of cumulative clouds, prognostic risk, vorticity*

1. はじめに

(1) 研究の背景

昨今、豪雨の発生頻度について温暖化、都市化と絡めて議論されるようになってきおり、最近数年の豪雨を振り返っても、広範囲での記録的な豪雨である、2009年7月末の中国・九州北部豪雨や2012年7月の九州豪雨といった梅雨期の集中豪雨や、2010年10月奄美での豪雨、2011年9月近畿南部に甚大な被害をもたらした台風の影響による豪雨が挙げられ、今後の増加が懸念される。しかし、近年発生したこのような豪雨のなかでも2008年に頻繁化した局地的集中豪雨(局地的大雨)と呼ばれる時間・空間的に小さなスケールの豪雨は、これまでに例のない災害をもたらした社会に多大なインパクトを与えた。いわゆる「ゲリラ豪雨」と呼ばれるものである。突然発生し、急激に発達した積乱雲による降水が小流域での出水を引き起こし、その激流により人命が失われる災害が相次いで発生した。予想をはるかに超えた急激な出水、ならびに親水空間の利用や下水道の整備の際に水流のそばに人がいたことに、「ゲリラ豪雨」による災害の共通点がある。予想を超えた急激な激しい出水の原因は、積乱雲が突然発生、急

激に発達し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、そして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雨が素早く下水道システムに流れ込んだこと、が考えられ、いくつかの要因が重なり悲惨な災害が起こった。現在話題にのぼっている地球規模での気候変動や都市部におけるヒートアイランド現象などが要因となりゲリラ豪雨はこれからも発生しうる可能性がある。今このゲリラ豪雨に対するきめ細かな防災情報の提供等の早急な対策が求められており、この豪雨の予測あるいは早期探知を可能にすることは水害による事故の防止及び軽減のため、また人々が安心して暮らせる社会のためにも大変重要かつ緊急な課題であると言える。

(2) ゲリラ豪雨の早期探知、自動追跡について

時間、空間スケールの小さな豪雨であるゲリラ豪雨に関する研究が近年は行われており、例えば中北ら(2009)はCバンドレーダーを用いて、高仰角観測(立体観測)がゲリラ豪雨の早期探知に繋がることを突き止めた¹⁾。さらに、国土交通省は平成21年度に、従来から使用されていたCバンドレー

ダーより高分解能を持つ X バンド MP レーダを導入し、中北ら (2011) は、この X バンド MP レーダによる立体観測データを解析することにより、同じ X バンドの低仰角のみの観測に比べ約 3 分早く、上空でゲリラ豪雨を探知することを明らかにするとともに自動探知する手法開発した²⁾。早期探知といってもこのように 5 分にも満たない時間ではあるが、タイムスケールが非常に小さいゲリラ豪雨において、1 分 1 秒でも早くゲリラ豪雨の存在を探知することが災害を軽減するリードタイムの確保に繋がるため、この 2 分、3 分は決して軽視できない時間となる。従って、高仰角観測はゲリラ豪雨の早期発見という観点からゲリラ豪雨災害の軽減に極めて有効であると示したと言える。また、中北ら(2011)はゲリラ豪雨の早期探知の他にも、3 次元的に降水域を自動追跡するモデルの開発に成功し、また、その追跡結果を用いた体積や内部挙動といった降水域の特性の解析も行った。また、この他にもゲリラ豪雨に関する研究としては、真木ら (2010) が、物理量である VIL (Vertically Integrated Liquid water: 鉛直積算雨量) を用いた短時間降雨予測などがある。

(3) 研究の目的

上空でできたゲリラ豪雨をもたらす可能性がある降水セル、いわゆる「タマゴ」を全て発達するとみなし過ぎて、警報を出した場合は、警報が出たにも関わらず豪雨が降らないという事態が増えて、警報がオオカミ少年化してしまい、いざという時に避難活動の遅れがでてしまう危険性がある。従って発生したタマゴが危険か否かという判断をできる限り早く、かつ正確に行うことも早期発見、追跡と並んで重要な課題である。しかし、現在このタマゴの危険性に関する研究はあまり行われていない。そこで本研究では X バンド MP レーダの高仰角観測によって早期探知された上空のゲリラ豪雨のタマゴが発達して地上に豪雨をもたらすのか、あるいは発達せずに消滅していくのかというタマゴの危険性を定量的な視点よりも定性的な視点で検討した。危険性の判断の基準として、発達すると思われるタマゴを「危険なタマゴ」、発達しないと思われるタマゴを「安全なタマゴ」と考え、本研究ではタマゴが発達するか否かによって危険性を予知することを目的としている。手法としては、レーダーによって直接観測されるドップラー風速を用いて、ゲリラ豪雨のタマゴ内にある渦を捉え、この渦の存在から危険性を予知していく。

また、渦解析については、通常は 2 台のドップラーレーダーの観測値を用いたデュアル解析により風速場を推定し、この結果に基づき定義式から渦度を推定する。しかし本研究では、単一のドップラーレーダーの観測値のみから近似的に渦度を計算し、この渦度の値 (正負) からタマゴの危険性について定性的に検討している。

2. 渦の着目理由と渦度計算方法

(1) 渦に着目する理由

まず本研究で渦に着目する理由について述べる。積乱雲の有無に関わらず大気には鉛直シアによって水平方向に軸をもつ水平渦が形成されていることがある。ここに積乱雲の形成に伴う上昇気流が存在するとこの水平渦が立ち上がり積乱雲内に鉛直方向に軸を持つ鉛直渦が形成され空気塊は回転しながら上昇していく。積乱雲の発達には断熱過程であり、このとき渦位は保存されるので、上昇気流によって引き伸ばされた空気塊は時に大きな渦度を生み出す。これが、鉛直渦が形成される大きな理由の一つである。そして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していることがわかっており、渦は積乱雲の周囲の水蒸気を積乱雲内に取り込む役割を果たす。このことから、上昇流によって鉛直渦が形成され、その渦が周囲の水蒸気を取り込み積乱雲内の水蒸気量を増やし、上昇気流を加速させることによってさらに渦を強くするという正のフィードバック効果が見えてくる³⁾。従って積乱雲内の渦の存在は積乱雲の発達と深く関連していると考えられることができる。以上のことから、鉛直渦の解析はゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に有効な指標となりうる可能性が極めて高いと考えられる。

(2) ドップラー風速の 3 次元データセット作成

次に渦度の計算方法について述べる。使用するデータは X バンド MP レーダから得られるドップラー風速の観測値である。1 回のレーダーの 3 次元観測は 5 分を要するため、厳密にはレーダーの仰角ごとに観測時刻が異なる。これに関して本研究では、防災という観点からリアルタイムでの情報配信を意識し、すべての仰角で観測された時刻を立体観測全体の出力時刻としている。すなわち、立体観測が 1 サイクル終了する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やドップラー風速の空間分布の観測値が瞬時に得られるものと見なしている。また、用いるデータは低い仰角から順次仰角を上げるようなデータセットとして、立体観測データを作成した。その上で、さらに解析を行い易くするために、データの空間配置を中北ら (1990) に従い 3 次元デカルト直交座標系 (以下、直交座標系と呼ぶ) における格子点上の値に変換した。また、極座標系を直交座標系に変換する際に、X バンド MP レーダの空間解像度が 150m であることを考慮し、水平方向 200m×200m、鉛直方向 200m というグリッドを考え、各グリッドのデータとしてグリッドの中心に格子点データとして受信電力値を与えた。次に、レーダービームが通過していない格子点に値を挿入するため、鉛直方向に線形に内挿補間を行った。さらに、こうして作成した 3 次元の格子点データを高度ごとに分類し (200m 間隔)、等高度面データ (CAPPI=Constant Altitude Plan Positioning Indicator

データ)を作成し、高度ごとの反射強度とドップラー風速の平面分布を求めた。本研究ではこうして作成された反射強度とドップラー風速のデータを利用していく。

(3) 渦度の計算方法

最後に、単一のドップラーレーダーの観測値による渦度の計算方法について述べる。ある格子点近辺で円状に渦が形成されていると考え、それに隣接する4つのグリッドへのレーダービームの照射角度を考慮して2つのグリッドを選択し、それらのドップラー風速の値の差分をとり格子点の距離で除するといった微分的な方法で渦度を求めた。また、本研究ではこのようにして求めた近似的渦度と、渦度の真値との定量的な誤差評価には言及しないことにする。理由としては、発達、未発達の判断には主に渦度の正負の判断が重要であると考え、もう一点は、一次元のドップラー風速からは渦度の真値は原理的には求めることができないことが挙げられる。また、水平風の平行移動成分に関して、格子点間の距離に比べてレーダーから格子点までの距離の方が充分大きい場合は、隣接する4つのグリッドにはビームが水平に照射していると考えられる。したがって、差分をとる際に観測値に含まれる水平風の平行移動成分は打ち消され、これによる影響は受けないと考えられる。図-1はレーダーに対する格子点Oの分類方法と隣接する4つのグリッドを示し、表-1はA, B, C, Dそれぞれの格子点に与えられたドップラー風速の観測値を V_A, V_B, V_C, V_D として、①~⑧のそれぞれの領域に格子点Oがいた時の渦度の計算方法を示している。 $d_1=200, d_2=282=200\sqrt{2}$ である。

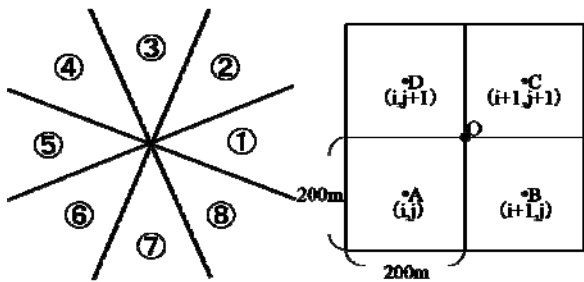


図-1 レーダーの周囲の角度を8分割した図(左)と格子点Oに隣接する4グリッドの配置図(右)

表-1 格子点Oの場所別の渦度計算式

格子点Oの場所	渦度計算式(1/s)
①	$V_A - V_D / d_1$
②	$V_B - V_D / d_2$
③	$V_C - V_D / d_1$
④	$V_C - V_A / d_2$
⑤	$V_D - V_A / d_1$
⑥	$V_D - V_B / d_2$
⑦	$V_D - V_C / d_1$
⑧	$V_A - V_C / d_2$

3. タマゴの自動探知手法の改良

(1) 従来手法と改良点

まず本研究では渦解析を行うタマゴについて、中北ら(2011)が行っていたタマゴの自動探知の手法を改良した手法によるタマゴの自動探知を行った。従来手法ではまず近畿にある鷲峰山、田口、六甲、葛城の4つのレーダーそれぞれにおいて2章で述べたような5分で1セットの3次元データを作成し、それらを田口を中心とした水平方向500m×500m、鉛直方向250mのグリッドの格子点データとして変換して4基を合成した合成反射強度データを作成し、降水域を「20dBZ以上の反射強度で0.5km²以上の面積を持つ閉曲線」と定義し、CCL(Connected Component Labeling)を3次元に拡張したものをを用いて3次元的に降水域を抽出する。こうして抽出された降水域を5分前の降水域と比較してタマゴを自動的に抽出する。具体的には、各降水域の重心を求め、各々に対し、5分前に存在する各降水域の重心からの距離を求め、距離を計算する。その際、前の時間に存在するどの降水域の影響球内にも重心が存在しない降水域が存在し、体積が0.125km³から0.625km³の範囲にある降水域をタマゴとするという手法である。また、この時の影響球の半径に関しては、降水域の移動速度は最大で60km/hour程度とされていることから、この速度で5分間移動すると考えて影響球の半径を5kmとしている。

以上が中北ら(2011)が行ったタマゴの自動探知の方法であるが、今回はこの手法に2点の変更を行った。まず第一の変更点としては、体積制限についてである。5分間の走査の間に急激に発達したタマゴを想定して、捉え逃しのないよう、上に記した体積制限の上限を解除した。また、次の変更点として、1km以下の低い層にある降水域の影響を受けないように影響球を計算する降水域を高度1km以上に重心が存在する降水域とした。以上のように改良した方法に従って、タマゴの自動探知を行った。

(2) 探知結果

本研究では2010年、2011年に発生したゲリラ豪雨から19のゲリラ豪雨のタマゴ発達事例と5つの未発達事例を抽出した。図-2はそれぞれの事例におけるタマゴの発生場所を示したものである。

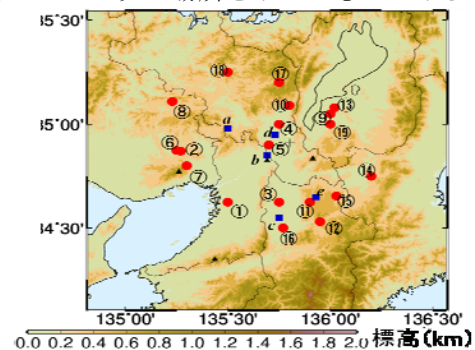


図-2 それぞれの事例におけるタマゴの探知場所

●は発達事例、■は未発達事例を示している。

表-2は発達事例における発生日，地上での降り始め，タマゴの探知時刻，渦確認時刻及び地上降雨強度最大時刻を示しており，表-3は未発達事例のそれぞれの発生日，地上での降り始め時刻及びタマゴの自動探知時刻を示している。

表-2 発達事例における発生日，地上での降り始め，タマゴの探知時刻，渦確認時刻及び地上降雨強度最大時刻

番号	日付	地上での降り始め時刻	タマゴ探知時刻	渦確認時刻	最大降雨強度時刻
①	2010/7/7	12:37	12:35	12:35	13:17
②	2010/7/16	16:27	16:15	16:15	16:55
③	2010/7/17	15:58	15:50	15:50	16:33
④	2010/7/24	16:53	16:50	16:50	17:17
⑤	2010/8/6	15:44	15:40	15:40	16:05
⑥	2010/8/14	12:23	12:20	12:20	12:35
⑦	2010/8/20	17:55	17:55	17:55	18:13
⑧	2010/8/20	18:28	18:30	18:30	19:15
⑨	2010/8/24	16:31	16:30	16:30	17:21
⑩	2010/8/24	16:59	16:55	16:55	17:17
⑪	2010/8/26	16:52	16:50	16:55	17:17
⑫	2010/8/29	16:10	16:10	16:10	16:42
⑬	2010/8/30	14:57	14:55	14:55	15:43
⑭	2010/8/31	15:21	15:15	15:20	15:45
⑮	2011/7/11	15:24	15:15	15:25	15:54
⑯	2011/7/24	16:24	16:25	16:25	16:39
⑰	2011/7/26	14:33	14:35	14:35	14:55
⑱	2011/7/28	10:18	10:20	10:25	10:41
⑲	2011/7/31	16:42	16:40	16:45	17:04

表-3 未発達事例における発生日，地上での降り始め及びタマゴの探知時刻

番号	日付	地上での降り始め時刻	タマゴ探知時刻
a	2010/8/6	15:45	15:45
b	2010/8/14	12:01	12:05
c	2010/8/21	16:35	16:40
d	2010/8/22	15:12	15:15
e	2010/8/26	16:41	16:40

この際，タマゴを自動探知できなかった事例に関しては目視による確認によって探知時刻としている。また，表-4は従来の自動探知手法と改良された自動探知手法との精度比較である。改良前ではタマゴの自動探知の成功が19事例中10事例にとどまっていたのに対して，改良後は19事例中16事例でタマゴの自動探知に成功した。また，探知できなかった原因として，小さな降水域がタマゴ近辺に多数存在していることが挙げられる。しかし，ゲリラ豪雨は主に単独の積乱雲であるのでこの問題は致命的にはならないと考える。

表-4 従来の自動探知手法（左）と改良された自動探知手法（右）

日付	結果	探知時刻	日付	結果	探知時刻
2010/7/7	×	-	2010/7/7	×	-
2010/7/16	○	16:20	2010/7/16	○	16:20
2010/7/17	×	-	2010/7/17	×	-
2010/7/24	×	-	2010/7/24	×	-
2010/8/6	○	15:45	2010/8/6	○	15:45
2010/8/14	○	12:20	2010/8/14	○	12:20
2010/8/20	○	17:55	2010/8/20	○	17:55
2010/8/20	○	18:30	2010/8/20	○	18:30
2010/8/24	×	-	2010/8/24	○	16:30
2010/8/24	○	16:55	2010/8/24	○	16:55
2010/8/26	×	-	2010/8/26	○	16:05
2010/8/29	○	16:20	2010/8/29	○	16:10
2010/8/30	×	-	2010/8/30	○	15:00
2010/8/31	○	15:20	2010/8/31	○	15:20
2011/7/11	×	-	2011/7/11	○	15:15
2011/7/24	×	-	2011/7/24	○	16:25
2011/7/26	×	-	2011/7/26	○	14:35
2011/7/28	○	10:20	2011/7/28	○	10:20
2011/7/31	○	16:45	2011/7/31	○	16:45

4. 渦解析による予知結果

次に本研究では，渦解析によってタマゴの危険性を検討した。渦は豪雨事例 19 のうち，全てでその存在が確認できた。また全ての事例で，渦度が $0.05s^{-1}$ 以上の渦が確認でき，渦度 $0.05 s^{-1}$ 以上の渦が存在する状態が 5 分間以上続いた。図-3 及び図-4 はタマゴ探知時からの 5 分ごとの反射強度 3 次元分布，ドップラー風速分布，渦度分布である。この図から，渦が存在すれば反射強度が強くなっていることがわかり，渦の存在とタマゴの発達に関連性を持つことが分かる。一方，発達しなかった 5 事例に関しても，2010 年 8 月 21 日を除く他 4 事例で渦度が $0.05s^{-1}$ 以上の渦が確認できた。しかし，発達しなかったが初期段階で渦が確認できた事例では，2010 年 8 月 14 日を除き他 3 事例では渦度が $0.05s^{-1}$ 以上の状態が 5 分も続かなかった。ここで， $0.05s^{-1}$ というのは正しい渦度の値ではなく，本研究で開発した手法に則って計算した渦度の値であることに留意して頂きたい。以上から渦が確認であると必ずそのタマゴが発達するとは限らないものの，タマゴの 5 分後の渦度分布をみることで，タマゴの危険性予知の可能性があると考える。

また，渦はタマゴを探知してから平均で約 1.6 分後に確認されている。このことから，タマゴ探知とほぼ同時に渦が確認されているといえる。事実，表-2 を見てもわかるように，全 19 事例中 14 事例で，タマゴの探知時刻と同時に渦が確認されている。また，全 19 事例におけるタマゴの探知時刻を 0 分と

した時の、渦の発生時間及び地上での降雨強度最大時間の頻度分布と平均を図-5に示す。図-5からわかるように、全事例を平均しても、地上での降雨強度が最大になる前には渦が確認されていることがわかり、渦の存在がタマゴの危険性予知に有効であることがわかる。また、発達しなかった事例を含む全事例についての予知精度を表したものが表-5である。ここで、本研究はタマゴが発達する場合には渦が確認されるかどうかの検証を目的としている。しかし、自動抽出では無いものの、念のためにいくつ

かの未発達の事例についても検証を行った。表-5からわかるように実際に発達した事例に関しては、100%の割合で予知の段階で発達すると予知できており、見逃しはなかった。また、実際は未発達だった事例に関しては、80%の割合で予知の段階で未発達と予知できており、全体を通して、発達・未発達の的中率は約96%の割合であることから渦の存在がタマゴの発達・未発達に大きく関わっていることがわかる。しかし、実際には未発達であったにも関わらず、予知の段階では発達と予知してしまう事

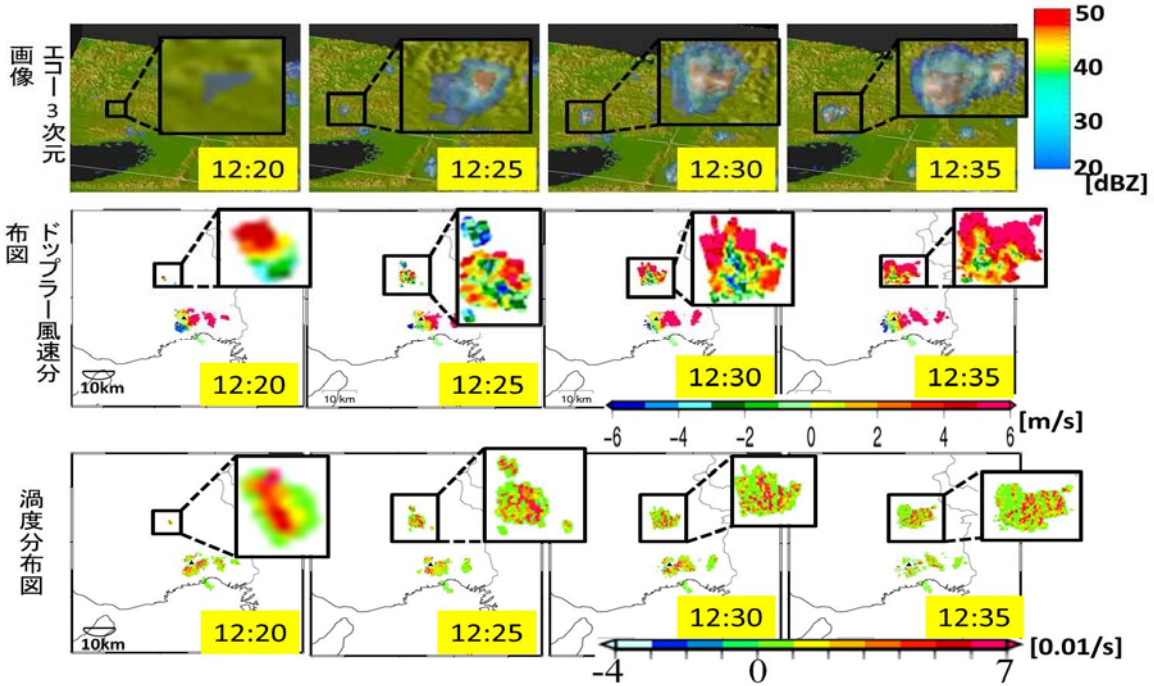


図-3 2010年8月14日（発達事例）の例。上から順に、XバンドMPレーダによって観測された反射強度の3次元画像、ドップラー風速分布図並びに渦度分布図。高度は5000mである。

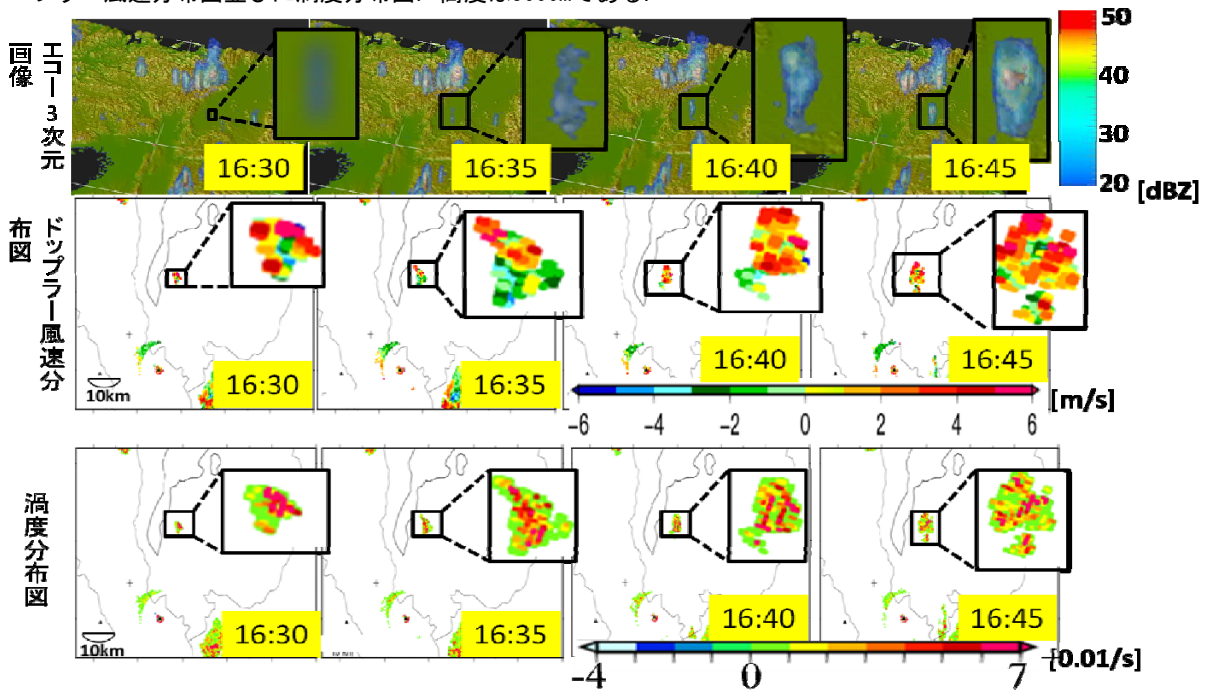


図-4 2010年8月24日（発達事例）の例。上から順に、XバンドMPレーダによって観測された反射強度の3次元画像、ドップラー風速分布図並びに渦度分布図。高度は3150mである。

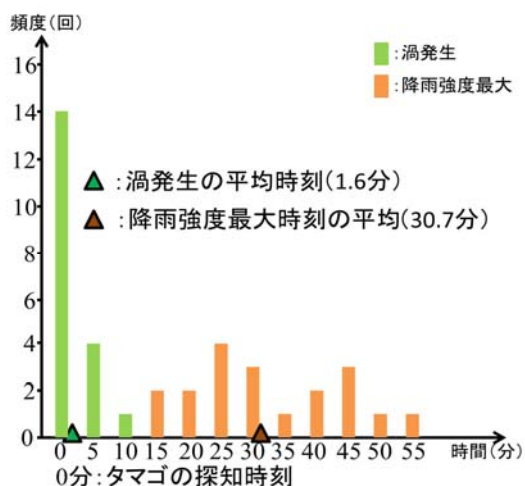


図-5 表-2において、タマゴ探知時刻を0分とした時の渦の発生時刻と地上での降雨強度最大時刻の頻度分布、及び全事例を平均した時間。

例が1事例あり、この原因として大気が安定していた可能性が考えられる。既往研究では大気の不安定性とタマゴが発達することの相関性はあまり高くないという報告がある。これを受け本研究では、大気の安定性とタマゴが発達しないこととの相関性を調べ、「未発達」の予知精度の向上にむけた要素の一つとして大気の安定性が利用できるかを検討していきたい。

表-5 渦による危険性予知の精度表

		実際		計
		発達	未発達	
予知	発達	19	1	20
	未発達	0	4	4
計		19	5	24

また本研究では、渦の存在とタマゴの危険性との関連性をさらに詳細に検証するため、鷲峰山レーダーを使用した事例に関して、数事例ではあるものの鷲峰山レーダー以外のレーダーを用いた渦解析によるタマゴの危険性予知を行った。2010年8月26日は鷲峰山レーダーからタマゴが危険であると予知ができたので、これを葛城山レーダーで観測されたドップラー風速を用いて渦解析を行った結果、渦の存在が確認され、同じく危険と予知できた。また、2010年8月29日も同じく鷲峰山レーダーからタマゴが危険であると予知できたので、これを田口レーダーで観測されたドップラー風速を用いて渦解析を行った結果、渦の存在が確認され、同じく危険と予知できた。一つのタマゴを異なるレーダーにより各々観測されたドップラー風速を用いて渦解析を行ったところ同様に危険と予知できたことから、レーダーからの方角に関わらず、タマゴが危険な場合は正しく予知できる可能性が示唆され、同時に渦の存在がタマゴの危険性と極めて密接に関わっていることが裏付けられた。

5. まとめと今後の課題

本研究は、上空で探知されたゲリラ豪雨のタマゴが発達する危険性があるか否かの判断を定性的に予知することを目的とした。そして、その判断の指標にタマゴ内渦の存在に着目し、この渦とゲリラ豪雨との関連性を、21の発達事例と5の発達しない事例を解析することにより検討した。その結果、タマゴ時点では発達するかどうかの判断は難しいものの、タマゴの5分後の渦度分布をみることでタマゴの危険性が予知できる可能性が極めて高いことを示した。また、数事例ではあるが一つタマゴに対して、異なるレーダーを用いての解析も行った。その結果、異なるレーダーによる解析でも同様の予知ができたことから、危険なタマゴはレーダーからの方角によらず予知できる可能性を示した。さらに、本研究では、タマゴ自動探知手法の改良も合わせて行い、その結果、改良前ではタマゴの自動探知の成功が19事例中10例にとどまっているのに対して、改良後は全19事例中16事例でタマゴの自動探知に成功した。これによって自動的にゲリラ豪雨のタマゴを抽出し、このタマゴの危険性を渦によって検討するといったシステムの構築が可能となる。

今後の課題としてさらなる事例解析があげられる。具体的な解析方針としては、発達事例に関しては、一つのタマゴを複数のレーダーによるドップラー風速の観測値から一様に同じ判断ができるかといった単一レーダーによる危険性予知の精度検証を重点的にを行い、未発達事例に関しては、3章でも述べたように、大気の安定性とタマゴの衰退性について検討していく。またさらなるタマゴの自動探知精度向上に向けて、タマゴの近くに存在する降水域と識別してタマゴと認識できるように改良していきたい。また、さらには本研究における手法から推定された渦度とタマゴの危険性との関連性を定量的にも評価していきたい。さらに先行研究との融合により、一連のゲリラ豪雨の予報システムの開発にも取り組んでいき、ゲリラ豪雨災害の軽減を目指していきたい。

参考文献

- 1) 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, 水工学論文集, 第54巻, 2010
- 2) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠: 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, 2011
- 3) 新野宏・野田暁・柳瀬亘: 大気対流と渦の数値シミュレーション, 日本数値流体学会誌, 第9巻, 第5号, pp.141-152, 2001
- 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, 5 August 2008-, SOLA, vol.6, pp.89-92, 2010

(2012. 9. 30受付)