

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

中北英一・西脇隆太⁽¹⁾・山口弘誠

(1)京都大学大学院工学研究科

要 旨

近年のゲリラ豪雨災害事例を例に挙げ、1分1秒でも早くゲリラ豪雨を探知・予測する超短時間降雨予測を実現するために、中北ら(2011)によるゲリラ豪雨の早期探知に関する研究を踏まえ、探知したゲリラ豪雨のタマゴが発達するか否かの「危険性予知」を本研究の目的と設定した。国土交通省 X バンド MP レーダで観測されるドップラー風速から二つのスケールの渦度、メソッ渦およびマイクロ渦に関して、豪雨との関連性を調べた。その結果、メソッ渦が形成されている時は地上では豪雨となることがわかった。またマイクロ渦に関しては、発達する全事例の半数以上の事例においてタマゴ時点での存在が確認できた。発達しない事例においてもマイクロ渦の存在が確認されたことから、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予知に資する可能性が十分に明らかになった。

キーワード: ゲリラ豪雨, 積乱雲のタマゴ, 危険性予知, 渦度

1. はじめに

1.1 研究の背景

(1)ゲリラ豪雨災害の特徴

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月末梅雨前線による中国・九州北部豪雨、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等の、集中豪雨が挙げられ、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

このように時間，空間スケールの小さな豪雨の監視体制の強化を目的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 レーダを導入した。そこで中北ら (2010) は，この X バンド MP レーダによる高仰角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に成功した。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。

1.2 研究の目的

上空でできたゲリラ豪雨をもたらす可能性のある降水セル，いわゆる「タマゴ」を全て危険とみなし過ぎて，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可能性がある。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を重視して，予知することを目的とする。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る。また，本研究ではスケールの異なる 2 つの渦（メソソ渦とマイクロ渦）を考え，それぞ

れの渦の存在から危険性を予知していく。

2. X バンド MP レーダとドップラー風速

2.1 ゲリラ豪雨の危険性予知にドップラー風速を用いる理由

ゲリラ豪雨の危険性予知の方法に関しては主に，中北ら (2011) によって，レーダー観測を用いる方法と，レーダー観測に加え現業の気象予報結果を用いる方法の 2 つの方法による詳細な検討がされている。まず観測を用いる手法の一つとして，タマゴの発生高度とタマゴの危険性との関連性を検討した。従来から言われてきた，発生高度が高い方がタマゴが発達しやすいのではないかと，という見解についてはあまり関連性は見られなかった。次に中北ら (2011) は予測モデルを用いる方法として，GPV 情報と AMeDAS を用いて推定した大気の力学的指標とタマゴの危険性予知との関連性を検討している。先の研究では力学的指標として気流の水平収束を取り上げてタマゴの危険性との関連性を調べている。その結果，タマゴの発生近辺の広い領域で風が収束していることから上昇気流の存在が確認でき，タマゴの危険性と気流の水平収束との大まかな関連性は示されているが，詳しく知るためにはタマゴ近辺でのピンポイントな収散を知る必要がある。そこで，中北ら (2011) は時間，空間共に高い分解能を持ち，リアルタイムで直接レーダー観測されているドップラー風速を利用した。ドップラー風速とは，レーダービームが照射された降水粒子の移動速度のビーム方向成分で，電波のドップラーシフトから観測されるものであり，その具体的な利用法として，積乱雲の発生・発達に関係する収束域や内部の渦形成（詳しくは次章にて述べる）の様子をドップラー風速を用いて把握することなどが挙げられる。中北 (2011) は，わずか 2 事例ではあるがタマゴが発達している時，レーダーから遠ざかる方向のドップラー風速とレーダーに近づく方向のドップラー風速がタマゴ内で混在していることを発見し，発達するタマゴ内での渦の存在の可能性を示唆している。このことから本研究では渦の存在とタマゴの危険性との関連性を極めて詳細に検討していくことにする。

2.2 X バンド MP レーダについて

X バンド MP レーダは現在，関東，中部，

近畿，北陸，東北，中国，九州に導入されており，近畿には4台のXバンドMPレーダ(田口，六甲，葛城，鷲峰山)が導入されている。本研究では主に鷲峰山のレーダー情報を用いる。またMPとはMulti Parameterのことで，ここでのMPとは水平方向の電波(水平偏波)と鉛直方向の電波(垂直偏波)の2種類の偏波のことを指す。しかし，本研究ではドップラー風速の利用を中心に考えていくのでここではあまり詳しくは触れないことにする。またXバンドMPレーダは，仰角を変化させながら降雨を観測できる3次元レーダーであり，降雨の立体構造を観測できるという利点を持つ。現業の観測では1分間のうち3仰角を観測し，そのなかで地方合成に用いるため固定仰角観測を1仰角，残り2仰角で3次元観測を行っている。現在は低仰角を密に観測する仰角となっており，固定仰角観測では半径40kmの定量観測範囲と半径80kmの定性観測範囲で観測している。

2.3 レーダーデータの処理

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。そのため，データの出力された時刻はボリュームスキャンの中間時刻とするのが一般的である。しかし，本研究では防災に視点を置いており，現実の観測においてボリュームスキャンの中間時刻では，走査が完了していない。そのため，本研究ではリアルタイムでの情報配信を意識し，データがすべて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，レーダー情報を使用した。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。これによりビームの走査時間による降水域の移動や傾き等を容易に把握できるようにした。本研究での解析対象に抽出したゲリラ豪雨の事例においてタマゴの探知には上で述べた方法で作成したデータを使用し，反射強度やドップラー風速に関しては上で述べた処理に加えて，各種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水平方向200m×200m，鉛直方向200mという粗めの格子を考え，各格子のデータとして格子の中心に格子点データとして受信電力値を与えた。この格子は，Xバンドレーダーの距離方向の分解能が150mであることに注意し，その分解能に対応した大きさで作成している。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う。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. メソγ渦を用いたタマゴの渦解析

3.1 渦度解析に着目する理由

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。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(例えば，新野ら，2001)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。従って渦度が大きいほど積乱雲は発達すると考えることができる。以上のことから，渦度の推定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。これが渦度推定の理由である。

3.2 メソγ渦の渦推定法

局所的な渦が多数集まってある程度組織化された2km程度の直径を持つ比較的大きな

渦を本研究ではメソγ渦と定義する。

また、メソγ渦の半径と中心の求め方については、降水粒子が鉛直方向のある軸の周りに様々な同心円を描きながら運動していると考え、降水粒子が形成するメソγ渦が同心円状の運動をしていると仮定する。すると、降水粒子の速度は回転速度と環境場の水平風の速度のベクトル和となる。レーダーが観測するドップラー風速の値は降水粒子の速度のレーダービーム方向成分の値なので、観測される値は円運動している降水粒子の速度のレーダービーム方向成分の大きさと、その環境場に吹いている水平風のレーダービーム方向成分の大きさの和となる。特に、円運動している降水粒子の速度方向とレーダービームが直交する点ではレーダーが観測するドップラー風速の大きさは環境場の水平風のレーダービーム方向成分のみとなり、このような点は各円につき必ず2地点存在し、この2地点を結んでできる直線がその円運動の直径と考えることができる。また、メソγ渦の内側でも同様に降水粒子は同心円を描きながら運動していると仮定しているので、レーダーの観測値が環境場の水平風のレーダービーム方向成分のみの値となる点はレーダービーム方向に一直線に並ぶことになり、この一直線上はほぼ同じ観測値（環境場の水平風のレーダービーム方向成分）が並ぶと考えられる。従って、レーダービーム方向に大きさのほぼ等しい観測値を得た範囲の両端を結んだ直線を渦の直径と考えることができ、渦の中心はこの直線の中点と考えることができる。（fig.1を参照）このような考えに基づいてドップラー風速のCAPIIデータから目視によってメソγ渦の存在を確認した。

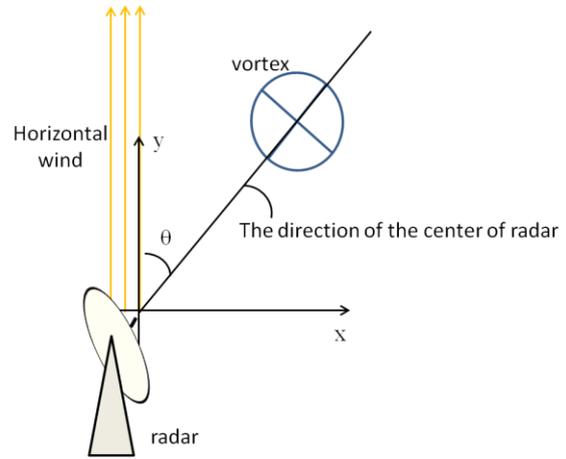


Fig.1 Axis of coordinates

また、渦は前節で述べたように反時計まわりで円運動していると仮定する。ここで降水粒子の円運動の回転速度を V (大きさ V) とし、fig.2 のように角度 α, β, θ 及び水平風 V_p (大きさ V_p) を設定する。

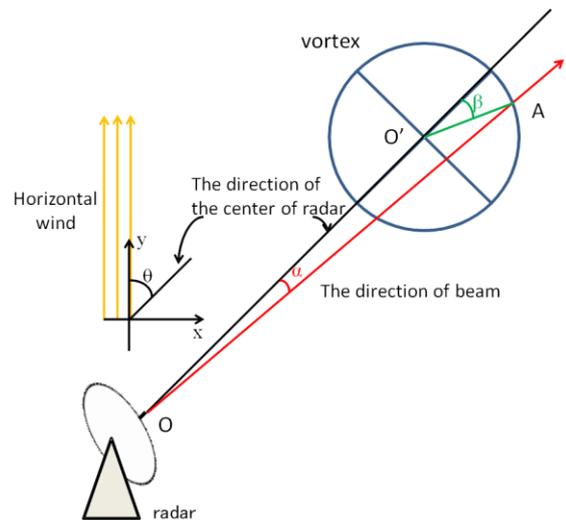


Fig.2 α, β, θ and V_p

レーダーで観測されるドップラー風速 P は、

$$P = V \sin(\beta - \alpha) + V_p \cos(\theta + \alpha) \quad (1)$$

となる。ここで β は OO' と $O'A$ のなす角度 (rad), α は OO' と OA のなす角度 (rad), θ は OO' と水平風のなす角度 (rad) である。また図 3.1 において三角形 $OO'A$ において、

$$r \sin(\beta - \alpha) = R \sin \alpha \quad (2)$$

となる。また、(2)から

$$\sin(\beta - \alpha) = \frac{R}{r} \sin \alpha \quad (3)$$

となるので(2),(3)からレーダーの観測値 P は,

$$P = V \frac{R}{r} \sin \alpha + V_p \cos(\theta + \alpha) \quad (4)$$

となる。ここで R はレーダーから渦の中心までの距離 (km), r は渦の半径 (km) において, R/r の値が V, V_p と比べて充分大きいと考えると, $V(R/r)\sin\alpha \gg V_p \cos(\theta + \alpha)$ となり ($\alpha=0$ 近辺では $V_p \cos(\theta + \alpha)$ の項の方が大きくなるがその時の値は高々 $V_p \cos(\theta + \alpha)$ なのでこれが P の最大値になりうることはない。), P が最大となる α は $V(R/r)\sin\alpha$ が最大となる時と考えてよい。従って, レーダーの観測値 P が最大となるのはレーダーからのビームが渦と接するときである。

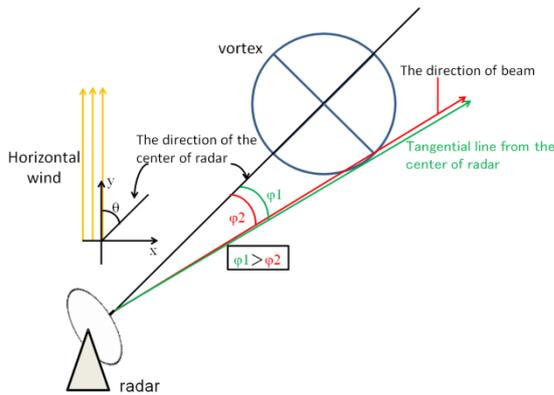


Fig.3 ϕ_1, ϕ_2

また fig.3 において ϕ_1, ϕ_2 をそれぞれ
 ϕ_1 : レーダーから引いた渦の接線と水平風のなす角度 (rad)
 ϕ_2 : レーダーと渦の中心を結んだ直線と垂直になる直径の端とレーダーとの角度 (rad)
 とすると

$$\sin \phi_1 = \frac{r}{R} \quad \sin \phi_2 = \frac{r}{\sqrt{R^2 + r^2}} \quad (5)$$

となる。ここで r/R が十分に小さいと考え,
 $(r/R)^2 \ll 1$ とできるとすると,

$$\frac{r}{\sqrt{R^2 + r^2}} \cong \frac{r}{R} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \cong \frac{r}{R} \quad (6)$$

とできるので $\sin \phi_2 \cong r/R$ となり, (5) から $\phi_1 \cong \phi_2$ となる。

すなわち, R/r の値が V, V_p と比べて充分大きく, 且つ $r/R \ll 1$ とできる場合はレーダーの観測値の最大値はほぼ, レーダーと渦の中心を結んだ直線と垂直になる直径の端にレーダーから引いた直線方向 (ϕ_2) の値に近似できることになる。以上からレーダーで観測されるドップラー風速の最大値 P_{\max} は, 上記の近似が成り立ち,

$$P_{\max} = V \frac{R}{r} \sin \phi_2 + V_p \cos(\theta + \phi_2) \quad (7)$$

と表すことができる。また, 同様に考えるとレーダーで観測されるドップラー風速の最小値 P_{\min} は,

$$P_{\min} = -V \frac{R}{r} \sin \phi_2 + V_p \cos(\theta - \phi_2) \quad (8)$$

となる。レーダーの観測から得ることのできるドップラー風速の情報はこの P_{\max} 及び P_{\min} である。渦度の定義式は $(\partial v / \partial x) - (\partial u / \partial y)$ であるが, 本研究では P_{\max} と P_{\min} の差をとり, その値を両地点の距離, つまり, 渦の直径で除したものを渦度推定の方法として採用した。

上記の推定法を採用した場合の渦度は, $\sin \phi_2 = r/R$ を用いると,

$$\frac{P_{\max} - P_{\min}}{2r} = \frac{V}{r} - V_p \frac{\sin \theta}{R} \quad (9)$$

となる。実際の渦度は,

$$\frac{V - (-V)}{2r} = \frac{V}{r} \quad (10)$$

となることから真値よりも $V_p \sin \theta / R$ だけ小さくなる。

以上から水平風を加味したメソ γ 渦の渦度推定には, 水平風とのなす角度の違

いによって、即ちメソγ渦を見る角度によって誤差が生じることが分かる。ただし、 $r/R \ll 1$ としているので基本的に誤差は小さな値をとるため、定性的な評価を行う時は無視できるオーダーであるものの、定量的な評価も行うために推定された渦度との比較を行い誤差を評価する。

3.4 メソγ渦によるゲリラ豪雨解析

本研究におけるゲリラ豪雨の解析の対象事例として抽出した事例は全部で13事例あり、このときゲリラ豪雨の選定基準として、「孤立」・「急激に発達」・「持続性」という定性的な判断基準に加えて、地上の降り始め時刻から30分以内に50mm/hの降雨強度へ発達した事例という定量的基準を設けて選定した。各事例の日付、発生場所、地上での雨の降り始めの時刻、タマゴを探知した時刻とその時の立体観測の仰角番号をそれぞれTable.1に示す。また、メソγ渦が確認された2010年8月6日の事例におけるタマゴ探知時のエコー3次元画像、メソγ渦確認時のエコー3次元画像及びドップラー風速の分布をfig.4に示す。またtable.2に示すように、発達しなかった事例も4事例を抽出し、比較対象に用いることとする。メソγ渦はタマゴが探知された時刻に形成されているとは限らず、むしろある程度積乱雲が組織化されたときに形成されているものであるため、タマゴの探知時刻で発達するかどうかという判断は難しい。ただし、タマゴの探知した時点で予知できていなくても、地上での豪雨がもたらされる時刻より前にメソγ渦の存在が確認できるかどうかという視点から見ると、防災上十分に意義深いと考える。

Table.1 The date, generating place, time when rain falls at ground, detection time of baby cell and number of angle of all the 13 develop cases

Date	Generating place	The time when rain falls at ground	detection time of baby cell and number of angle
2010/7/24	Southwest of Lake Biwa	17:00	16:56 EL4
2010/8/6	West of DPRI	15:44	15:37 EL6
2010/8/24	Southeast of Lake Biwa	16:49	16:46 EL4
2010/8/24	Southwest of Lake Biwa	16:59	16:52 EL6※
2010/8/26	North part of Nara Pref.	16:52	16:51: EL4
2010/8/29	North part of Nara Pref.	16:10	16:06 EL4
2010/8/30	Southeast of Lake Biwa	15:28	15:22 EL6
2010/8/31	Northwest part of Mie Pref.	15:21	15:14 EL9
2011/7/11	Northeast part of Nara Pref. ~ South part of Shiga Pref.	15:24	15:21 EL6
2011/7/24	North part of Nara Pref.	16:24	16:30 EL3
2011/7/26	East part of Kyoto Pref.	14:33	14:35 EL3
2011/7/28	Center part of Kyoto Pref.	10:18	10:25 EL3
2011/7/31	Southeast of Lake Biwa	16:42	16:40 EL4

※baby cell was detected earlier by Doppler velocity than by echo

Table.2 The date, generating place, time when rain falls at ground, detection time of baby cell and number of angle of all the 4 not develop cases

Date	Generating place	The time when rain falls at ground	detection time of baby cell and number of angle
2010/8/6	West of DPRI	15:45	15:43 EL7
2010/8/21	North part of Nara Pref.	16:35	16:32 EL5
2010/8/22	Northwest of DPRI	15:12	15:07 EL5
2010/8/26	Northeast of Naa Pref.	16:41	16:37 EL6

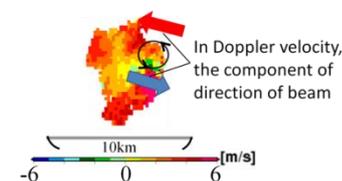
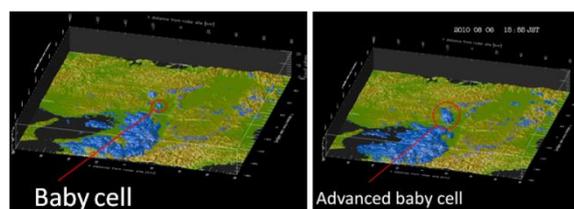


Fig.4 Echo three-dimensional image of the detection time of baby cell(upper left), echo three-dimensional image of the time when mesoγ vortex was identified(upper right) and the distribution of Doppler velocity at the same time

3.5 渦度の誤差評価

誤差が無視できない事例が本研究の対象事例に含まれているかどうか検討するため、

本研究でメソγ渦が確認できた9事例についての誤差項の評価を行った結果、2010年8月6日、2010年8月31日の2事例で誤差が10%を上回る結果となったのでこの両事例に関しては今後この点に注意して解析を進めていく必要があるものの、基本的に本研究では渦度の正確な値の推定に重点を置いておらず、あくまで渦度は危険性の定性的な予知の手段として用いているので、本研究での渦度推定法における渦の仮定（円運動をしているなど）によるこの程度の誤差は許容するものとする。

3.6 メソγ渦による豪雨の発達の解析

(1) メソγ渦の有無と地上での豪雨の関連性

発達した13事例中9事例でメソγ渦の存在が確認できた。この9事例におけるメソγ渦の出現高度は2~6km、その鉛直方向の広がりには200m~1400mであり、その直径は約1500mであった。Orlanski (1975)の気象現象の空間スケール分類法によるとメソγスケールは2~20kmの気象現象とされており、本研究の解析で確認された渦の空間スケールもメソγスケールに準ずるスケールとなっている。また、発達しなかった4事例においてはいずれもメソγ渦が存在していなかったため、本研究の対象事例においては、メソγ渦が存在すると必ず豪雨をもたらすと言える。そのため、メソγ渦の存在によって警報を促すことが可能であると考えられる。一方で、豪雨がもたらされているときに必ずしもメソγ渦が存在していたとは限らなかった。

(2) メソγ渦と豪雨の発達の時間発展

メソγ渦が存在し、豪雨がもたらされた9事例全てにおいて、メソγ渦の出現時刻は、地上での降り始め時刻よりは遅れるが、地上で豪雨をもたらすよりも必ず早い時刻であり、その時間差は平均で8.9分前であることがわかった。また、本研究ではゲリラ豪雨の事例抽出に50mm/hより強い降雨強度を基準としているがメソγ渦が確認できた事例では全ての事例で60mm/hを超える強い降雨強度を観測していた。加えて、地上での雨の強さが最大となる時刻とメソγ渦の出現時刻を比較すると、10.7分前に上空でメソγ渦が確認されていることもわかった。メソγ渦が確認された9事例において、タマゴ探知時刻、メソγ渦発生時刻、地上での降雨強度最大時刻の時間関係を平均したものをfig.5に示す。また、

メソγ渦の予知精度をtable.3に示す。

(3) 渦度と地上降雨強度との関係

渦度の大きさと最大地上降雨強度の関係を調べたところ、相関係数が0.18であり、強い相関はみられなかった。したがって、メソγ渦の渦度を用いたタマゴの危険性の定量的な評価は難しいと考える。

3.7 メソγ渦のまとめ

ここまで、メソγ渦の有無と地上での豪雨の関連性、メソγ渦と豪雨の発達の時間発展について述べてきた。これらをベースに、メソγ渦がゲリラ豪雨の危険性予知に活かせるかどうかという観点からまとめると以下のようである。

地上で60mm/h以上の雨が降る時には必ずメソγ渦が確認できることから、メソγ渦が第1章で述べた警報のオオカミ少年化の防止に繋がることは間違いない。また、メソγ渦が確認できてから約10分後に地上での雨の強さが最大となることが明らかになったことから、メソγ渦は定性的ではあるが、タマゴの危険性の予知に有効であるといえる。

しかしながら、メソγ渦の推定方法として、半径と中心を決める際のパラメータの閾値に明確な数字を定めていないことなど、目視によって渦の存在を決めているという問題があり、自動化する作業が必要である。さらに本質的な問題として、より早期にタマゴの危険性を予知できないかという課題が残る。そこでこのような課題を解決するためにマイクロ渦という渦を次章以降で取り上げていく。

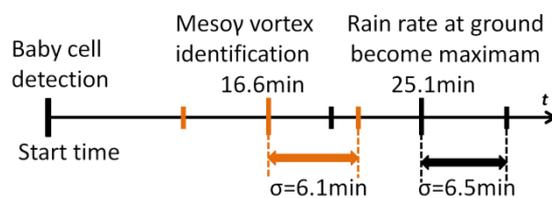


Fig.5 The average time when mesoγ vortex was identified and when rain rate at ground became maximum. (We considered The time of baby cell was detected as start time) σ : standard deviation

Table.3 Forecast accuracy of meso γ vortex

		real		sum
		danger	safe	
forecast	danger	9	0	9
	safe	4	4	8
sum		13	4	17

4. ミクロ渦を用いたタマゴの渦解析

4.1 ミクロ渦の定義と渦度推定法

前章の最後でメソ γ 渦の課題として、より早期に危険性を判断することの必要性をあげた。具体的には、地上に豪雨がもたらされる直前ではなく、よりタマゴの発生に近い時刻、もしくはタマゴの発生時に渦を確認できないか、ということである。この時の渦を 3.1 節で述べた現象と対応させると、気流の鉛直シアによって水平渦が形成され、それが上昇気流によって立ち上がり、鉛直渦となった直後における渦管のことであり、XバンドMPレーダによるドップラー風速でこれを捉えることができるのかということを見ていく。従って、本章ではメソ γ 渦よりさらに空間スケールの小さな渦を対象とし、この渦をミクロ渦と呼ぶことにする。ミクロ渦は、より微分的な概念に基づいた渦度を求めることによってその存在を確認する。前章でのメソ γ 渦は本章でいうところのミクロ渦が集まった積分的な概念に基づいていると考えやすい。また本章では、メソ γ 渦の存在が確認される時刻より前にミクロ渦の存在は確認されているか、あるいは、ミクロ渦の渦度分布が地上にもたらされる豪雨と何か関連性を持っているのかについて詳細に検討していく。

また渦度の推定法に関しては、格子点データの差をとり、格子点間の距離で除するという 3.3 節で述べた方法と方針は変わらない。また、ミクロ渦が確認された 2010 年 8 月 31 日の事例における、ミクロ渦確認時のエコー3次元画像、ドップラー風速の分布及び渦度分布を fig.6 に示す。

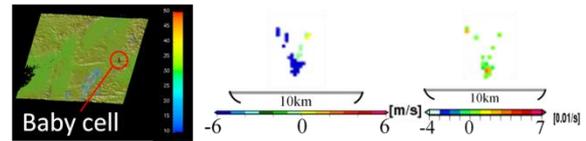


Fig.6 At the time when micro vortex was identified, echo three-dimensional image(left), the distribution of Doppler velocity(center) and the distribution vorticity(right)

4.2 ミクロ渦による豪雨の発達の解析

(1) ミクロ渦の有無と地上での豪雨の関連性

第3章で述べたとおり、メソ γ 渦は 13 事例中 9 事例で存在が確認されたが、ミクロ渦は豪雨事例 13 事例中全てでその存在が確認できた。この時の渦の出現高度は約 3~8km であった。また全ての事例で、渦度が $0.05s^{-1}$ 以上のミクロ渦が確認でき、渦度 $0.05 s^{-1}$ 以上のミクロ渦が存在する状態が 5 分以上続いた。一方、発達しなかった 4 事例に関しても、2010 年 8 月 21 日を除く他 3 事例でミクロ渦が確認できた。そしてこの発達しなかったがミクロ渦が確認できた 3 事例に関しても渦度が $0.05s^{-1}$ 以上のミクロ渦が確認できた。しかし、発達しなかった事例は発達した事例とは違い、渦度が $0.05s^{-1}$ 以上の状態が 5 分も続かなかった。Fig.7 にその一例を示す。以上からミクロ渦に関しては確認できたとしても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。

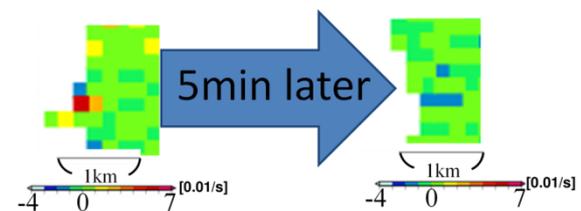


Fig.7 In not develop case, the distribution of vorticity at the time when micro vortex was identified(left) and at 5 minutes later after micro vortex was identified(right)

(2) ミクロ渦と豪雨の発達の時間発展

ミクロ渦はタマゴを探知してから平均で約 6.5 分後に確認されている。この 6.5 分という時間についてだが、2.3 節で述べた処理方法でデータを作成している。従って、得られるデータは立体観測全体が走査し終わる 5 分の間隔であるため、もしタマゴを探知したのと同時にミクロ渦を確認していたとしても、

その時刻が含まれる 5 分サイクルの立体観測の走査が終了する時刻のデータとしてマイクロ渦が確認される。このデータの作成方法上やむを得ず発生する時間差を加味しての 6.5 分なので、実際はこの時間差よりも短い時間で探知できていると考えてよい。つまり、タマゴを探知した時刻が含まれる 5 分データにマイクロ渦が確認されているのであれば、それはタマゴの探知とほぼ同時にマイクロ渦ができていると考えてよい。そこで、タマゴ探知した時刻が含まれる 5 分データにマイクロ渦が確認された事例は、発達した 13 事例中 7 事例であった。すなわち、タマゴの探知時点で危険性予知を行うことができ、これはより早期に危険性を予知するという前章の最後で述べた課題を解決できるものである。

また地上での降雨強度が最大となる時刻とマイクロ渦の確認時刻を比較すると、全事例を平均して 18.4 分前に上空でマイクロ渦が確認されていることもわかった。メソγ渦は 10.7 分前に確認されたことと比較すると、マイクロ渦はメソγ渦よりさらに 7.7 分前に出現していることがわかった。また、全 13 事例を平均して、タマゴの探知時刻をスタートとする降り始め時刻、マイクロ渦の発生時刻、メソγ渦の発生時刻、地上での降雨強度最大時刻の関係を fig.8 に示す。

4.3 ミクロ渦のまとめ

本章では、メソγ渦の場合と比較しながら、マイクロ渦によるタマゴの渦度解析を行ってきた。Fig.9 にタマゴ探知、マイクロ渦、メソγ渦、地上降雨強度最大の平均的な時間関係を示す。53%（13 事例中 7 事例）でタマゴ時点でマイクロ渦の存在が確認でき、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 分後のマイクロ渦の渦度分布をみることでタマゴの危険性予知に資する可能性が十分に明らかになった。Table.4 にマイクロ渦の予知精度を示す。なお、Table.4 に示した結果は fig.7 で示したような 5 分後にマイクロ渦が消滅した場合も正しく予知できたとしている。

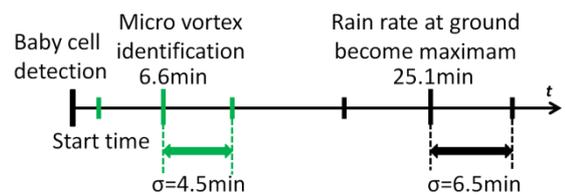


Fig.8 The average time when micro vortex was identified and when rain rate at ground became maximum.(We considered The time of baby cell was detected as start time) σ : standard deviation

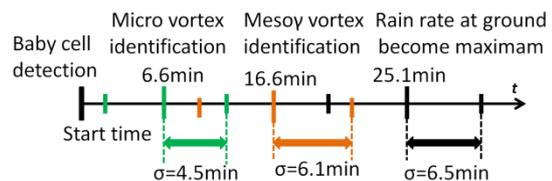


Fig.9 The average time relation of the detection of baby cell, the identification of micro vortex, the identification of meso γ vortex and the maximum rainrate at ground (We considered The time of baby cell was detected as start time) σ : standard deviation

Table.4 Forecast accuracy of micro vortex

		real		sum
		danger	safe	
forecast	danger	13	0	13
	safe	0	4	4
sum		13	4	17

5. 複数のレーダーを用いた 1 分毎の渦度解析

5.1 解析方法

前節までは、単独のレーダーサイト（鷲峰山レーダー）の情報を用いて、5 分ごとの 3 次元データを作成し、渦度解析を行ってきた。しかし、本節では近畿に配備されている他のレーダーサイトからの情報も用いて、1 分毎の渦度解析を行うことにする。ある降水セルを複数のレーダーから観測するとレーダーによって観測する高度が違う。観測高度はレーダーから降水セルまでの水平距離とその時の観測仰角から求めることができる。このこと

を利用して、降水セルの渦度の3次元分布をおよそ1分毎に把握することができる。なお、渦度の求め方はマイクロ渦の渦度推定と同様の方法で求めている。

5.2 1分毎のマイクロ渦によるタマゴの解析

実際に本研究で抽出した事例を用いて1事例ではあるが5.1節で述べた方法で解析を行った。用いた事例としては2011年7月24日の事例である。Table.1を見れば分かるが、この事例は、地上で降雨がもたらされてから、上空で降水セルを発見した事例である。しかし複数のレーダーを用いて観測をすると、16時22分に田口レーダーがタマゴを探知していた。続いて16時23分に六甲、葛城両レーダーがタマゴを探知している。この時間における高度ごとの渦度分布をfig.10に示す。

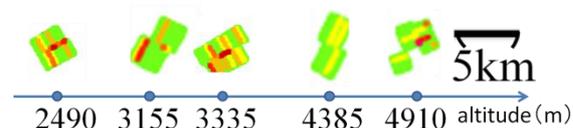


Fig.10 The distribution of vortex at each altitude (date and time: 2011.7.24 16:23)

16時23分の時の高度ごとの渦度を見ると、2500mから3500mにかけて渦度が大きくなっていることがわかる。

このことから、わずか1事例ではあるが複数のレーダーを使用することによって渦管の存在が確認することができ、危険性の早期の予知並びにタマゴの早期探知の可能性が示された。今後は、防災の観点から都市部を中心に事例解析を進めていく。

6. 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の渦の存在に着目し、スケールの違うメソッ渦とマイクロ渦の2つの渦を定義して、これらの渦とゲリラ豪雨との関連を、13の発達事例と4の発達しない事例を解析することにより検討した。その結果メソッ渦に関しては、タマゴ探知からやや遅れるものの確実な指標としての可能性が示唆された。また、マイクロ渦に関しては、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分後のマイクロ渦の渦

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示唆された。また複数のレーダーを用いることによっておよそ1分毎の渦度の3次元分布が把握でき、複数のレーダーを用いることがタマゴの危険性予知に有効であることを示した。

今後の課題としては、事例解析を進めて、本研究における推定法から推定された渦度と豪雨との関連性を定量的に評価していきたい。また、本研究とタマゴの早期探知と自動追跡に関する研究を融合し、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くことによって、ゲリラ豪雨災害の軽減を目指していきたい。簡易ではあるがこの注意喚起の一例をfig.11に示す。

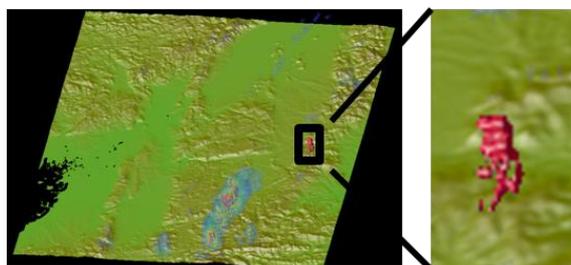


Fig.11 Echo three-dimensional image baby cell which has the danger of developing flashes red

参考文献

- 白石栄一：局地的な降雨観測・予測技術の動向，科学技術動向，文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター，第95号，pp.34-45，2009
- 高橋劭：雲の物理—雲粒形成から雲運動まで—，東京堂出版，pp.172，1987
- 中北英一：地形が降雨場に及ぼす影響を考慮した短時間降雨予測手法の開発と3次元レーダー情報の利用に関する研究，京都大学博士論文 1990
- 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
- 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
- 新野宏・野田暁・柳瀬亘：大気の対流と渦の数値シミュレーション，日本数値流体力学会誌，第9巻，第5号，pp.141-152，2001
- 三隅良平・圓山憲一：下層空気収束による積

乱雲の降水強化-形成される下層雲の役割
に注目した数値実験-, 日本気象学会
1052:202, 2008

Orlanski, I.: A rational subdivision of scales for
atmospheric processes, *Bull, Amer, Meteor,
Soc*, Vol56, pp.527-530, 1975

(論文受理日 : 2012 年 6 月 8 日)

Research on Anticipation of Risk of a Baby Cell of Guerrilla-heavy Rain by Analysis in Terms of Vorticity that Uses Doppler Velocity

Eiichi NAKAKITA, Ryuta NISHIWAKI⁽¹⁾ and Kosei YAMAGUCHI

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

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 vortices with different size, and evaluate a relationship qualitatively between rainfall and the existence of vortex.

Keywords: Guerrilla-heavy-rainfall, baby cell of cumulative clouds, anticipation of risk, vorticity