

Kaバンド偏波レーダによるマルチパラメータ情報を利用した 積乱雲発生の基礎的解析

Preliminary Analysis of Cumulonimbus Cloud Structure Using Multi Parameter Information of Ka-band Polarimetric Doppler Radar

中北英一・新保友啓⁽¹⁾・佐藤悠人⁽²⁾・山口弘誠・大東忠保⁽³⁾・篠田太郎⁽³⁾・坪木和久⁽³⁾

Eiichi NAKAKITA, Tomohiro NIIBO⁽¹⁾, Hiroto SATO⁽²⁾, Kosei YAMAGUCHI
Tadayasu OHIGASHI⁽³⁾, Taro SHINODA⁽³⁾ and Kazuhisa TSUBOKI⁽³⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(2) 株式会社日立製作所

(3) 名古屋大学宇宙地球環境研究所

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

(2) Hitachi, Ltd.

(3) Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Synopsis

Nowadays, the frequency of tragic disasters caused by localized torrential rainfall is increasing. This tragic disaster was brought by suddenly generated and rapidly developed isolated cumulonimbus cloud. For earlier risk detection of torrential rain fall, some researchers use Ka-band cloud radar and they revealed it can detect cells 20minutes before X-band radar can. In this study we analyze the cumulonimbus cloud in earlier stage in different aspects and it was found the relationship between Ka-band radar first echo height and cloud particle development by comparison Lifting Condensation Level with first echo height. Secondly, we found the growing speed was the highest in time of X-band radar first echo appeared. Finally, we reveals Ka-band radar can detect the vorticity in earlier stage than it had observed by X-band radar. These result shows usefulness of Ka-band radar for applying Early detection system and risk judge system.

キーワード: ゲリラ豪雨, 早期探知, Kaバンド偏波レーダ, LCL, 渦度

Keywords: Guerilla heavy rainfall, Early detection, Ka-band polarimetric radar, LCL, Vorticity

1. はじめに

1.1 研究背景

2008年7月28日, 兵庫県都賀川において, 局地的豪雨により突然の出水が発生し50名が流され, 5名の尊い命が奪われる水難事故が発生した。(国土交通省, 2009) 同年8月5日には東京都豊島区雑司が谷で発生

した局地的集中豪雨により地下下水道で作業員5名が流され2名の命が奪われた。この事故をきっかけに, 都市域での局地的な豪雨による災害に対する関心が社会的に高まった。地球温暖化などの気候変動の影響に関する研究をまとめた, IPCC第5次報告(2013)や, 気象庁の気候変動監視レポート(気象庁, 2016)では, 将来はこのような局地的豪雨が増加する確率

は高いと報告されている．特に都市域では，このような局地的な豪雨が発生すると，雨が効率よく下水道に流れ込み，小河川へと集中してしまうことにより人命に関わるような急出水や急激な水位上昇が発生する．こうした急発達するゲリラ豪雨は時間スケールが1時間程度の短期間で急発達するとともに数km程度のスケールの現象でありメソ気象モデルでは予測が困難である．このような局地的豪雨に対しては気象レーダを利用して豪雨の観測・予測が行われる．都賀川豪雨の際にも気象レーダによる観測予測は行われていたが，レーダで降水を捉えた直後に出水が発生し，従来の観測体制では危険を把握することはできなかった．このゲリラ豪雨災害は気象レーダの監視体制における防災上の課題を浮き彫りにし，1分という極めて短いリードタイム確保の重要性を改めて認識させた．

こうした中で中北ら（2008,2010）によってゲリラ豪雨をもたらす危険のある積乱雲の早期探知に関する研究がすすめられ，X-band MPレーダの立体観測により雨粒が生成される段階での探知ができることが示された．さらに中北ら（2014）はドップラー風速から推測される渦度が強い場合にはほぼ確実に積乱雲が強く成長することを示し，片山ら（2015）はこれを利用してXバンドレーダを用いた早期探知システムを開発した．その早期探知システムは実用化され自治体等向けに配信されている．一方でさらに早期での探知を目指して，Xバンドレーダよりも小さな粒径の粒子を観測することができる雲レーダを利用し，雨粒ができる前の雲粒の塊についての研究が進められている．Sakurai et al. (2012) と 疋田 (2016) は雲レーダのひとつであるKaバンドレーダに関して，Xバンドレーダよりも15分から25分程度早くファーストエコーを捉えることができ，発達前のレーダ反射因子の急激な増加が発達の指標となりうることを示した．これらの研究は発達を早い段階で探知しレーダ反射因子の特徴を捉えたものである．

1.2 研究目的

本研究では，今まで捉えられなかった積乱雲発達初期の雲の内部の特徴を明らかにしてゲリラ豪雨の早期探知の可能性を示すことを目的としている．Kaバンドレーダで観測される偏波パラメータ情報やドップラー情報を複合的に利用することで，雲粒や雨粒の生成といった雲物理を捉えることに取り組んだ．さらに，それを踏まえて現業用の気象レーダでは捉えることのできなかった積乱雲の生成初期段階の雲の内部の構造や発達に向かうメカニズムの解明に挑んだ．探知やレーダ反射因子の特徴を解析していくことに加えて，さらに偏波パラメータを利用して解

析を行った．この研究により現業用気象レーダで雨粒を捕らえる前にKaバンドレーダにより積乱雲発達の危険性を評価しさらに早い予測の可能性を見出す．このことは，現在研究での利用が中心のKaバンドレーダの偏波パラメータ情報の利用を展開していくことにより今後のゲリラ豪雨災害対策の更なる向上の可能性を示すことになると考えられる．

2. ゲリラ豪雨と気象レーダ

2.1 ゲリラ豪雨の特徴

ゲリラ豪雨災害とは，第1章でも述べたように，突然の豪雨による出水，激流（鉄砲水）により人命が奪われるという悲惨な災害である．本研究では，ゲリラ豪雨とは「突如出現して，急激に発達し，局地的に強い降水をもたらす，予測困難で災害をもたらす豪雨」と定義する．また，ゲリラ豪雨は社会的には広く認知されているものの，その言葉自体は気象学の専門用語ではなく，ゲリラ豪雨の表現として「局地的集中豪雨」「局地的大雨」等が用いられることもある．しかし，本研究では，「ゲリラ」から想像される「短時間（突如，急激）」，「局地的」に加えて「人命への危険」という言葉を重要視しており，本論文では以降，ゲリラ豪雨という言葉を用いる．

2.2 ゲリラ豪雨をもたらす積乱雲

ゲリラ豪雨は孤立的に発生，発達する積乱雲によってもたらされるのが特徴である．この単独の積乱雲の発達過程を概念的に示したのがFig.1である（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．発達期初期，大気が不安定な中，Fig.1①では，湿った空気が上昇し凝結することで雲粒になる．この雲粒は非常に小さいため現業気象レーダでは探知できないが，本研究で利用するKaバンド偏波レーダでは観測することができる．Fig.1②の段階では，雲粒が集まり降水粒子が上空にのみ形成される．この段階になり現業用気象レーダでも探知される．Fig.1③では，このタマゴは発達して段々と雲頂高度も高くなる．しかし，上空にのみ降水粒子を蓄えながら発達するため，こ

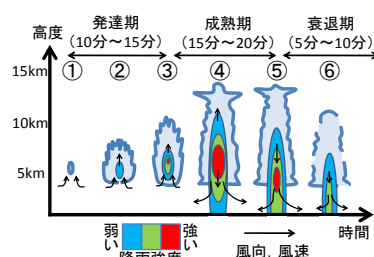


Fig. 1 Schematic figures of developing process of an isolated cumulonimbus cloud. (Shiraishi,2009)

の段階では地上には降水はまだもたらされない。発生から30分程度経った成熟期になると、Fig.1④、⑤のように雲頂高度が圏界面に達するほどに成長する。雲内部では十分に蓄えられた降水粒子が上昇気流で支えられなくなり落下し、その強い降水に伴って下降気流が現れる。そして、減衰期のFig.1⑥では上昇気流や下降気流は弱くなり、降水も弱まる。以上のような発達衰弱が30分～1時間弱で行われる。このような積乱雲の発達過程の概念から、本研究では対象事例の抽出の際、「30分以内に地上に50mm/h以上の降雨をもたらすまでに発達した積乱雲」を基準としてゲリラ豪雨の抽出を行った。

2.3 早期探知と危険性予測手法

中北ら（2011）は、XバンドMPレーダの立体観測を用いて、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（2013）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。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。また、片山ら（2015）は、ドップラー風速から算出される渦度や収束量に加えて、エコー頂高度差（セル発生からエコー頂高度の増加量）、鉛直発達速度（エコー頂高度差を時間で除した値）、鉛直積算エコー強度と豪雨をもたらす降水セルとの関係性を調査し、ファジー理論を用いて上記の5指標

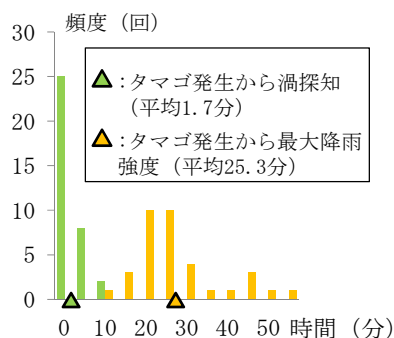


Fig. 2 Distribution of vorticity detection timing

を統合したゲリラ豪雨危険度指数を作成した。それを用いて各雨雲の警戒ランクを3段階で判定する手法を開発し、Web表示するシステムを構築して、淀川ダム統合管理事務所のサーバに実装しており、幾つかの自治体に試験配信している。渦度を用いるためすべてのゲリラ豪雨の発生を事前に予測することが可能である。一方で、危険と判定した雲が実際には発達しない場合もあり自治体等が利用を進めていく上での課題となっており、自治体等での利用に適したシステムへの改善が行われている。

これらの研究と並行して、現業用の気象レーダで用いられるCバンドやXバンドよりも短い波長帯のKaバンドレーダを利用して積乱雲の発生初期の雲粒生成段階の観測を行おうとする研究が行われている。Sakurai et al. (2012)は2011年8月18日に関東地方西部の山岳地帯で発達した積乱雲1事例を対象にKaバンドレーダとXバンドレーダを用いて同期観測を行い積乱雲の発生段階について観測を行いXバンドMPレーダよりも約25分早くファーストエコーを捉えることを示した。さらにレーダ反射因子の増加率が積乱雲の発達を予測指標になる可能性を示唆した。疋田（2016）は2015年夏季に名古屋で急速に発達した積乱雲4事例に対してKaバンドレーダとXバンドレーダで観測を行い4事例平均で15.5分早くKaバンドレーダでファーストエコーを捉え雲レーダの積乱雲の早期探知への可能性を示すとともに、ファーストエコー後のレーダ反射因子の増大率の違いによる発達予測の可能性を示唆した。本研究ではこれらの先行研究を踏まえKaバンドレーダで観測できる発達初期段階の積乱雲を偏波パラメータやドップラー風速によって算出される渦度を利用することにより積乱雲発生から発達に至る過程を明らかにしようとするものであり、Xバンドレーダで利用され始めた予測システムよりもより早い段階での危険性予測の可能性を示すものである。

3 本研究で利用したレーダとデータ

3.1 Kaバンド偏波レーダ

Kaバンドレーダは送信周波数が約34.87GHz（波長約8.6mm）のミリ波レーダであり、レーダ送信周波数の高い方が水滴からの散乱が大きくなる（浜津ら）という電波散乱の特性上、現業用の気象レーダのCバンドやXバンドレーダに比べて、感度が高く降水を伴わないような雲や霧の観測が可能であるため雲レーダとも呼ばれる。一方で電波の減衰は大きくなるため観測範囲は半径30km程度と比較的狭い領域である。本研究では偏波観測に加えてドップラー

観測の機能を搭載した名古屋大学Kaバンド雲レーダ（以後Kaバンドレーダと記す）で観測されたデータを利用し雲の解析を行った．レーダの諸元をTable1に示す．Kaバンドレーダは2015年7月から9月まで名古屋大学東山キャンパスに設置された．一定仰角で方位方向に全周スキャンするものをPPI（Plan Position Indicator）スキャンと呼び，このPPIスキャンを複数の仰角で繰り返し行う立体観測（ボリュームスキャン）が行われた．その後鉛直断面の観測を行うRHI（Range Height Indicator）スキャンが東西方向に実施された．以上の観測が10分周期で繰り返し実施された．Fig.3にKaバンドレーダの位置と観測領域を示す．また，Fig.4, Fig.5に観測例RHI観測によって得られた層状性の雲域と対流性の雲域の観測事例を示す．詳細な構造を捉えられていることが確認できる、このレーダの特長を生かして研究を進めた．

3.2 Xバンドレーダ

Ka バンドレーダを名古屋に設置していた際の比較対象のデータとして国土交通省 X バンド MP レーダのデータを利用した．X バンドは，9GHz 帯の波長約 3cm にあたる．波長が気象レーダでは

Table1 Ka-band radar information

諸元		
送信周波数		34.866GHz (短パルス[0-9km])
		34.871GHz (長パルス[9-30km])
波長		8.598mm
アンテナ形式		カセグレン、直径 2.1m
偏波面		水平偏波及び垂直偏波
主方向利得面		52dB 以上
ビーム幅		0.4° 以下
雑音指数		3.5dB 以下
最小受信電力		-109.5dBm 以下
分解能	動径	150m
	方位角	0.35°
最大探知距離		30km
設置位置	緯度	北緯 35.1519
	経度	東経 136.9719
	標高	91.7m
PRF パルス繰り返し周波数		1680Hz
		1120Hz
ナイキスト速度	折返補正なし	3.612m/s
	折り返し補正後	7.224m/s

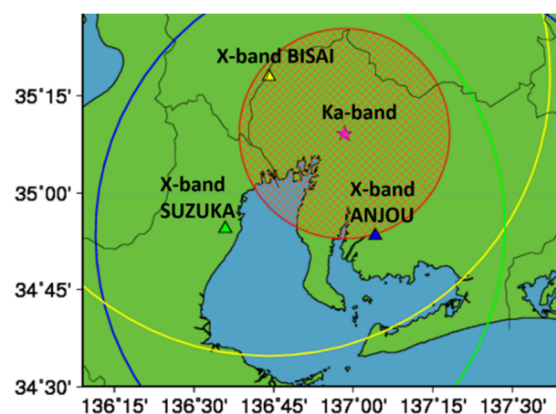


Fig.3 Radars Location. Star denotes the location of Ka-band radar and triangles denote that of X-band radar. All three X-band radars covered Ka-band observation area.

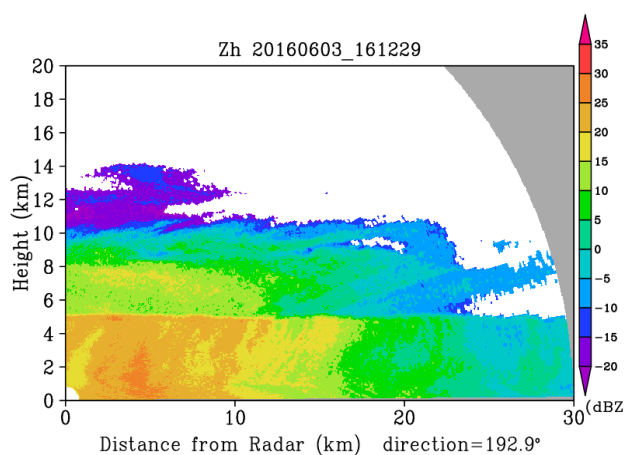


Fig.4 An example of stratiform clouds Z_{HH} echos by Ka-band radar RHI scanning observation

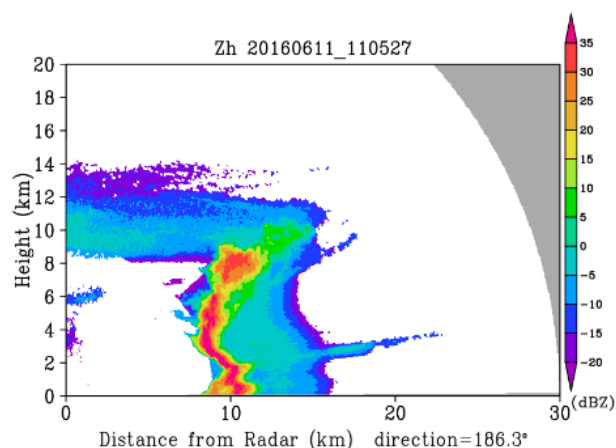


Fig.5 An example of cumulonimbus clouds Z_{HH} echos by Ka-band radar RHI scanning observation

比較的短く降水粒子を主な観測対象として高い空間分解能で精度よく雨量を推定することができる。MP とは、Multi Parameter の略であり、水平偏波による受信電力以外の情報を利用することを意味しており、国土交通省 X バンド MP レーダでは、ドップラー観測と水平偏波と鉛直偏波の二偏波による観測が実用化されている。MP という言葉が曖昧性を含んでしまうため本論文では国土交通省の運用するレーダを X バンドレーダと呼ぶものとする。本研究で利用した名古屋周辺の 3 台の X バンドレーダの諸元を Table4 に示し Fig.5 にレーダの位置と観測範囲を示す。偏波パラメータの導入、レーダのネットワーク化により、降雨による電波減衰の問題が改善された。X バンドレーダは、PPI スキャンを、仰角を変えながら繰り返し行う立体観測を行っている。国土交通省が導入した X バンドレーダは、河川管理のために低仰角を時間的に密（1 分間隔）に観測する運用モードとなっている。しかし、1 章で述べたように、立体観測がゲ

Table2 X-band radar information

諸元		安城 ANJOU	鈴鹿 SUZUKA	尾西 BISAI
送信周波数		9755MHz	9725MHz	9795MHz
送信偏波の種類		45° 偏波		
分解能	動径	150m		
	方位角	1.2°		
最大探知距離		80km		
設置位置	北緯	34.890	35.299	34.908
	東経	137.068	136.735	136.598
	標高	25m	62m	42m
パルス繰り返し周波数		1800MHz 1440MHz		

リラ豪雨監視に有用であるという結果から、全国一律に 5 分に一度の立体観測を実施している。

3.3 データの処理方法

本節では、Kaバンドレーダのデータ、Xバンドレーダ、レーダデータの処理について詳細に述べる。

3.3.1 ノイズの除去

ノイズ処理とは、レーダ観測データに含まれる観測対象外のエコーを除外し、より精度のよいデータを出力する手法である。Kaバンドレーダのドップラー風速と偏波パラメータデータに関しては、偏波間相関係数を用いた処理に加えてノイズに対する最小受信電力の比を表す SNR (Signal to Noise Ratio) を用

いてノイズ処理を行った。ρ_{HV}は粒径の縦横比が変化する度合いに関するパラメータであり、雨のような単一の降水粒子だけが存在する場合は縦横比の値には相関があり、1に近い値を示す。一方で、様々な種類や形の粒子が存在する場合やグラウンドクラッターを検出した場合は相関が小さくなり、小さな値を示す。これを利用して ρ_{HV}が0.6以下の場合にノイズとみなしエコーの除去を行った。中北らが ρ_{HV}=0.7を閾値としていたのに比べて閾値を低く設定したのは雲の生成段階においてKaバンドレーダで観測される受信電力が非常に低くノイズレベルに近いために雲の生成段階のエコーを誤って除去してしまうことを防ぐためである。SNRは水平、鉛直偏波の受信電力 Pr_{obs}と最小受信電力Pr_{min}を用いて下記の式(1)でそれぞれ算出した。

$$SNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{10^{\frac{Pr_{obs}}{10}} - 10^{\frac{Pr_{min}}{10}}}{10^{\frac{Pr_{min}}{10}}} \right\}. \quad (1)$$

SNRが0.6以下であるものをノイズとして除去した。Xバンドレーダの観測値についてもSNRを利用して補正を行った。

3.3.2 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。各PPIスキャン観測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。KaバンドレーダやXバンドレーダに関しては、1分間隔の出力時刻を設定した。観測で得たレーダデータを可視化するために施した処理を以下に示す。レーダアンテナから発射されるレーダビームには幅があるために、レーダデータの空間分解能はレーダから遠くなるほど粗くなる。Kaバンドレーダの場合、水平偏波、鉛直偏波のビーム幅は共に約0.35度であり、レーダから離れるとレーダビーム間に隙間が生じ、観測できない範囲が生じる。本研究では、解析目的から、あえて隙間の補間を行わなかった。Fig.6に示すように、レーダサイトからレーダビーム直下の点までの距離をLd[km]、ビーム高度をH [km]、経度、緯度方向の距離をそれぞれx[km]、y[km]とする。レーダビームで測定した方位方向の距離をr [km]、地球の半径をRe[km]、レーダサイトの標高をhr[km]、観測仰角をθe[rad]とすれば、Ld、H、x、yはそれぞれ、

$$L_d = kR_e \tan^{-1} \left(\frac{r \cos \theta_e}{kR_e + h_r + r \sin \theta_e} \right) \quad (2)$$

,

$$H = \frac{r \sin \theta_e + h_r + kR_e}{\cos \left(\frac{L_d}{kR_e} \right)} - kR_e, \quad (3)$$

$$x = L_d \sin \theta, \quad (4)$$

$$y = L_d \cos \theta, \quad (5)$$

となる．ここで k は大気による屈折を考慮する係数であり，標準大気の平均値を考慮し $k=4/3$ とした．また，は北から時計回りの方位角である．上記のようにして，極座標レーダデータを2次元直交座標系に変換した．その際，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 $25\text{m} \times 25\text{m}$ の格子点に投影した．また図を作成する時に，高度 $H[\text{m}]$ の情報も与え，高度の等値線を引いた．作成した図の一例をFig.7に示す．また，レーダからの距離とレーダビームが通過する高度の関係をFig.8に示す．

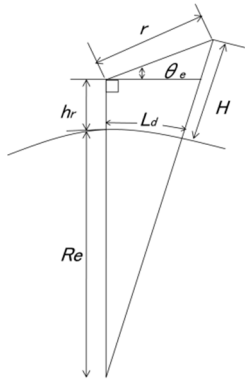


Fig.6 how to calculate the echo's height.

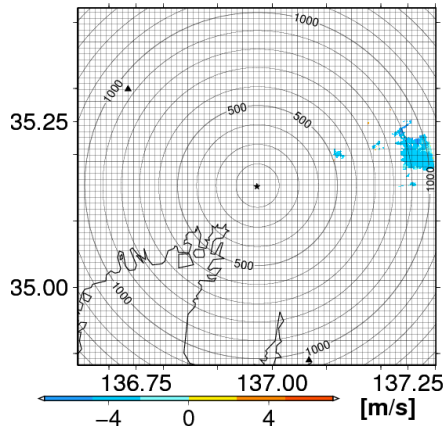


Fig.7 PPI scanning echo's figure

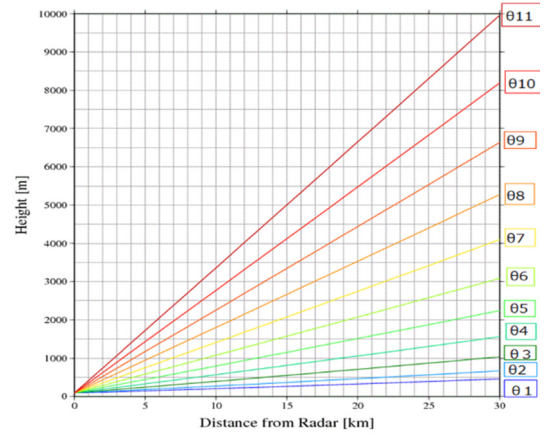


Fig.8 radar beam's height

3.3.3 擬似渦度の計算手法

本研究では，中北ら（2016）の先行研究と同様にドップラー風速から擬似渦度を算出し，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，

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (6)$$

と表せる．これを極座標 (r, θ) に変換すると

$$\zeta = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right\}, \quad (7)$$

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(7)の右辺の第2項の情報しか得ることができない．ここで，渦がFig.9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．本研究では，定義式中で得られない第1項が第2項と同程度の大きさであると仮定して，ドップラー風速から算出される第2項を2倍し，渦度を次の式のように定義した．

$$\zeta = 2 \times \frac{v_a - v_b}{2r}. \quad (8)$$

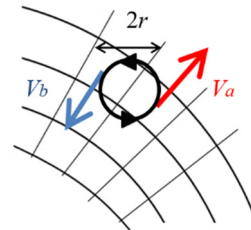


Fig.9 an image of calculate the vorticity by Doppler verocity

4. Ka バンドレーダを用いた積乱雲の解析

4.1 解析手法

4.1.1 事例の抽出方法

2015 年 8 月の名古屋で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。第 3 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。この XRAIN により作成した地上降雨強度の図を Fig.10 に示す。事例の抽出条件は、中北ら (2016) に倣い「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」積乱雲とした。積乱雲の発生から地上降雨開始までの雲の構造を対象とするので、上記の条件に「Ka バンドレーダの観測範囲内で発生し地上降雨をもたらした」積乱雲という条件も追加した。この条件に従い 11 事例を抽出した。さらに正田 (2016) が解析した 3 事例中 1 事例は条件を満たしたものの 2 事例は条件を満たさなかったが先行研究で扱われたものをより詳しく見る必要があると考え解析対象に加えた。Table3 に全 12 事例をまとめた。Table3 に示す事例番号 1, 3, 4 が正田の事例である。

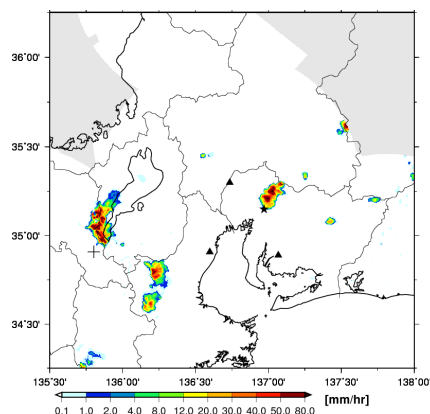


Fig.10 An example of ground level rain rate.

4.1.2 積乱雲発生までの追跡

解析には X バンドレーダと Ka バンドレーダそれぞれについて水平偏波のレーダ反射因子 Z_{HH} の PPI スキャンデータの平面投影図を用いた。また、図中に 1km×1km のメッシュを引き、レーダエコーの位置を比較しやすくするとともに積乱雲の規模を把握しやすくした。Fig.11 に一例を示す。また、Ka バンドレーダのレーダ反射因子データ Z_{HH} に関しては、可能な限り生データに近いデータの利用を目的としてノイズ除去は短パルス域、長パルス域それぞれで -109dBm, -125dBm 以下のデータを取り除いただけでその他の処理は行わなかった。これはノイズレベルに近い小さな値の雲を捉えている有意なエコーがノイズ除去等で取り除かれてしまうことを極力防ぐためである。すなわち、Ka バンドレーダの能力を最大限に活用し積乱雲の発達メカニズムを解明するという本研究の目的に則して生データに近いデータを用いて、自動処理では判断できない雲のエコーとノイズとの違いを幾つかの条件を定め目視により区別した。雲を捉えている有意なエコーとノイズを区別する条件は「複数の仰角で鉛直につながりを持っていること」「エコーが 5 メッシュ (3125 m²) 以上であること」と定めた。対流雲

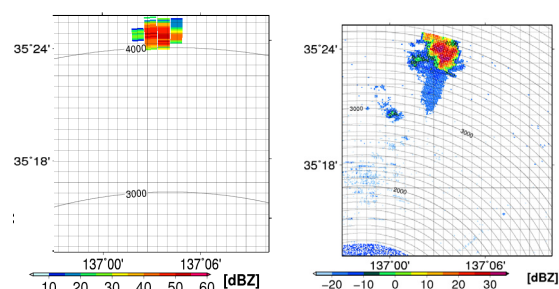


Fig.11 An example of X-band radar echo's and Ka-band radar echo.

Table 3 Selected Guerilla heavy rainfall event's

番号	年	月	日	降り始め時刻	降雨強度の変化			降り始めから50mm/h到達までの時間(分)	発生した方角 (Kaから)	レーダからの距離	レーダパルスの領域
					40mm/h到達	50mm/h到達	80mm/h到達				
1	2015	8	3	14:49	15:11	15:26		0:37	南	6 km	短パルス域
2	2015	8	3	16:32	16:42	16:43		0:11	北	2 km	短パルス域
3	2015	8	5	16:38	16:57	16:59		0:21	北北東	21 km	長パルス域
4	2015	8	6	16:54	17:12				南	24 km	長パルス域
5	2015	8	7	16:18	16:30	16:31	16:48	0:13	南東	1 km	短パルス域
6	2015	8	13	14:54	15:03	15:04	15:09	0:10	南東	16 km	長パルス域
7	2015	8	13	16:25	16:37	16:39		0:14	南東	21 km	長パルス域
8	2015	8	13	16:56	17:02	17:03		0:07	東	5 km	短パルス域
9	2015	8	21	11:00	11:23	11:38		0:38	南	24 km	長パルス域
10	2015	8	28	15:27	15:34	15:37		0:10	東	3 km	短パルス域
11	2015	8	28	15:28	15:38	15:40		0:12	南東	14 km	長パルス域
12	2015	8	28	15:43	16:04	16:05		0:22	南	12 km	長=>短
13	2015	8	29	17:51	18:04	18:07		0:16	北北東	9 km	短=>長

が発生して最初にレーダで捉えられるエコーを「ファーストエコー」と呼ぶ（小林, 2015）。ただし、レーダ探知範囲外にすでに存在していたものがレーダ探知範囲に入ったために始めて観測されるものもここではファーストエコーと呼ぶものとする。以下、それぞれのレーダにおけるファーストエコーの特定方法について述べる。まず各レーダのレーダ反射因子のデータから作成した PPI スキャンデータの平面投影図を用いて地上降雨をもたらした雲を特定する。直前のスキャン画像を確認しそのエコーの周囲 1 km 圏内に存在するようなエコーの中で同一の積乱雲のエコーを特定しエコーの高度を高度の等値線から読み取り記録した。ただし、Ka バンドレーダについては一回のボリュームスキャンが 10 分毎でありエコーを探知できている間隔が 10 分程度になることがあるので、雲の移動速度から逆算した場所にあるエコーを同一の雲であると決めた。この作業を繰り返し、時間を遡るようにエコーの有無を確認してゆき、これ以上時間を遡ってもエコーが確認できない場合をファーストエコーと定義しその PPI スキャンが行われた時刻を、ファーストエコーを観測した時刻と定義して記録した。ただし、前段に述べたようにここで定義したファーストエコーはレーダのレーダビームの通過する 3 次元観測範囲の中のみで観測することができた最初のエコーであり、必ずしも中北ら（2012）の示す積乱雲の発生初期段階のエコーを意味するゲリラ豪雨のタマゴとは一致しない。すなわち、Fig.8 に示すように最大仰角のレーダビームより高い高度はレーダ探知範囲外となるため、そこで発生した雲を捉えることができない。3 基で観測領域を広くカバーしている X バンドレーダに比べ 1 基のみで観測を行っている Ka バンドレーダは観測範囲が狭くなってしまう。そのために観測可能領域外で発生したタマゴが発達し降水粒子や比較的大きな雲粒子の下端の高度が下がったときになってはじめて最初のエ

コーを観測することがある。そこで、操作仰角で観測できる領域とレーダからの距離の関係を示した Fig.8 を用いてエコーの高度とレーダビームの通過高度を常に確認することにした。本研究の対象は積乱雲の初期のメカニズムを解明することであるので Ka バンドレーダでゲリラ豪雨のタマゴを探知できた 7 事例のみについて以後の解析を行った。それ以外の場合、すなわち観測可能高度以上でタマゴが発生しタマゴを検知できなかったものについても Ka バンドレーダ 1 台での現段階の走査等による限界を示すためにファーストエコー時刻の結果まで掲載する。

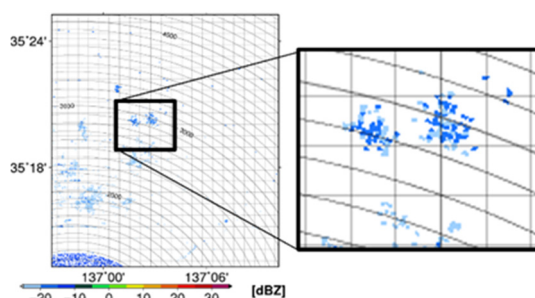


Fig.12 A first echo detected by Ka-band radar.

4.2 Ka バンドレーダによる初期積乱雲の探知

4.2.1 Ka バンドレーダのファーストエコー

先行研究で示されているように Ka バンドレーダは X バンドレーダと比較して 10 分から 20 分程度早くファーストエコーが検知される。これは、積乱雲の生成過程において雲粒だけで構成されている初期段階は感度の良い Ka バンドレーダのみで捉えることができ、積乱雲が発達するに従い雲粒の併合等によって降水粒子が生成され始めると X バンドレーダで確認されるからである。

X バンドレーダと Ka バンドレーダそれぞれについて定めたファーストエコー時刻の比較を行い

Table4 first echo's height and time detected by each radar

番号	年	月	日	降り始め時刻	Ka-First Echo	見えた高度の範囲(m)	X-First Echo	Ka:高度の範囲(m)	X:高度の範囲(m)	地表面降雨からKa	X-Ka
3	2015	8	5	16:38	16:05	3700 4700	16:22	500 5200	700 2800	0:33	0:17
4	2015	8	6	16:54	16:33	1700 3100	16:47	500 3200	1900 1900	0:21	0:14
7	2015	8	13	16:25	16:12	780 1600	16:23	1000 7000	600 3600	0:13	0:11
6	2015	8	13	14:54	14:33	1300 2300	14:48	1300 3200	2500 3500	0:21	0:15
9	2015	8	21	11:00	10:51	550 3100	10:56	550 3100	1100 2800	0:09	0:05
11	2015	8	28	15:28	15:03	1100 3800	15:22	700 7500	900 2300	0:25	0:19
12	2015	8	28	15:32	15:15	2000 2800	15:28	700 3800	3000 3000	0:17	0:13
13	2015	8	29	17:51	17:05	250 2600	17:30	300 4000	1500 2800	0:46	0:25
1	2015	8	3	14:49	14:37	2000 2000	14:47	350 2800	800 6500	0:12	0:10
2	2015	8	3	16:32	16:25	600 1200	16:27	600 1200	3800 7000	0:07	0:02
10	2015	8	28	15:27	15:15	600 1200	15:26	300 3000	900 4500	0:12	0:11
8	2015	8	13	16:56	16:52	400 4000	16:56	400 4000	1000 5100	0:04	0:04
5	2015	8	7	16:18	16:11	200 2000	16:01	x	x	0:07	X

Ka バンドレーダが X バンドレーダに対してどの程度早くファーストエコーを探知することができたかを検証した。その結果を Table4 に示す。Ka バンドレーダから 1km の距離でファーストエコーを捉えた 1 事例をのぞいて、10 事例において X バンドレーダよりも早くエコーを探知できていた。発生初期の積乱雲を探知していた 7 事例については X バンドレーダより平均して約 19 分早く捉えていた。また、積乱雲の発生初期を捉えた事例での Ka バンドレーダでのファーストエコーの一例を Fig.11 に示す。Ka バンドレーダで観測したファーストエコーはどの事例においても -20~-15dBZ であり、発達が進むにつれて Z_{HH} は次第に大きくなり Ka バンドレーダで -5~-0dBZ のエコーを観測した頃に X バンドレーダでファーストエコーを探知した。このとき Ka バンドレーダの Z_{HH} が -5~-0dBZ の値であったのはおよそ高度 3000m のエコーであり、それが X バンドレーダでも Z_{HH} が 10dBZ 以上のエコーとして観測された。浜津ら¹⁶⁾が示したように Ka バンドレーダの Z_{HH} から推測される雲粒子の粒径はおよそ 100~200 μ m である。

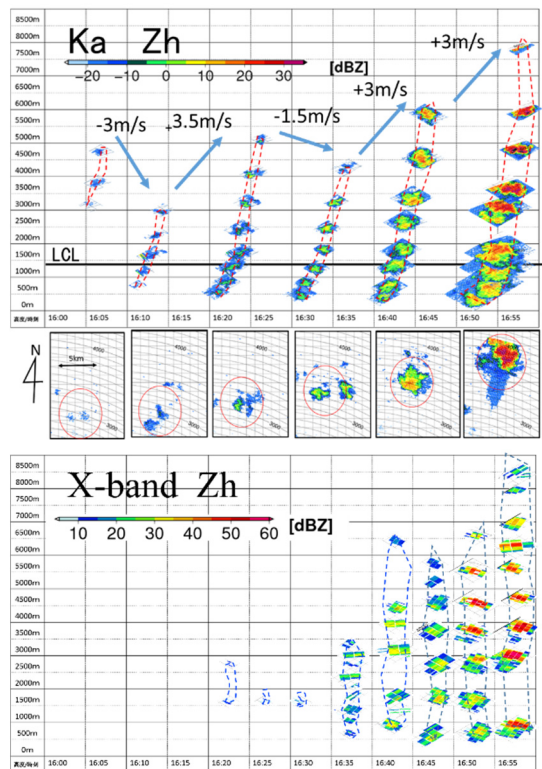


Fig.13 Echo's vertical profile. Horizontal axis shows detecting time and Vertical axis shows height. The upper figure shows Z_{HH} echo detected by Ka-band radar PPI scan and lower figure shows Z_{HH} echo detected by X-band radar PPI scan. Central lows shows the horizontal movement of Ka-band radar echo.

X バンドレーダが降水粒子（粒径 100 μ m 以上）になったものを捉え始めたと考えられる

次に、Ka バンドレーダでファーストエコーを捉えてから地表面降雨をもたらすまでの積乱雲の発達過程を可視化するために PPI スキャンを時間と高度の軸のグラフ上に並べた Fig.12 のような図を作成した。Fig.12 では Ka バンドレーダで観測した Z_{HH} の画像を時間と高度に従って並べている。一方、X バンドレーダでは 3 基のレーダで高仰角と低仰角を交互に観測していたため得られた Z_{HH} の画像を 5 分毎でまとめて鉛直に並べている。Ka バンドレーダでファーストエコーを探知してから X バンドレーダでファーストエコーを探知するまでに 1~2 回のボリュームスキャンを行い初期積乱雲の構造を捉えていた段階では 1000m から 3000m の範囲でエコーが鉛直方向に広がるのが確認された。

4.2.2 凝結持ち上げ高度（LCL）とファーストエコーとの関係

ある地点の空気を仮想的に乾燥断熱過程で持ち上げた際に凝結が始まる高度を持ち上げ凝結高度（LCL : Lifted Condensation Level）と呼び、一般的には雲底高度と一致することが知られている。Ka バンドレーダでファーストエコーを捉えた時刻の前後 1 時間の期間で気象庁の名古屋気象台で各時刻の 0 分に観測された気温、気圧、水蒸気圧の値から地上の空気塊が持ち上げられたとして LCL を算出した。ここで名古屋気象台の観測値を利用したのは Ka バンドレーダの観測領域内で湿度や水蒸気圧といった空気の湿潤の度合いを観測している観測地点が名古屋気象台のみであったからである。また、一時間おきの観測値を LCL の算出に利用したのは長い時間スケールのデータを用いることで広い空間スケールを代表する値として扱うことができるため、気象台とエコーを観測した地点との距離の隔たりを捕うことができると考えたからである。この観測値からエマグラムを用いて LCL を図解により算出した。エマグラムにより得られる LCL の気圧と気温の情報から静水圧仮定に従って LCL の高度を算出した。Table5 にエコーの最低高度と LCL との比較の結果を示す。LCL と積乱雲の最低高度を比較したところ全 7 事例で LCL より高い高度でエコーが探知されていた。そこで、LCL よりも数百 m 高い高度で Ka バンドレーダでファーストエコーを捉えた原因を凝結と Ka バンドレーダの探知性能の観点から考察する。Ka バンドレーダが探知できる最小のレーダ反射因子強度は、観測対象とレーダとの間に雲が存在

しない理想的な条件の場合、20km 地点でおよそ -20dBZ 程度であり、雲水量 0.1g/m^3 の雲を想定し、一様な粒径分布を仮定した場合約 $40\mu\text{m}$ の粒径の雲粒まで観測できる(浜津ら, 2000)。また Y. Ogura et al. (1972) の示した Fig.14 に示す暖かい雨をもたらす積雲のモデル数値実験の結果を参考に雲の発達過程について述べる。今回対象とする雲は雲頂が融解層を越え氷粒子が生成されるような積乱雲であるものの生成過程において氷粒子が生成されるまでは同様の現象が起こると考え参考とした。LCL まで空気塊が上昇すると飽和状態となり空気中の凝結核を核として凝結が始まる。このモデルでは Fig.14 に示すように雲が発生してから 10 分後の雲の下部では $40\mu\text{m}$ 以下の粒径の雲粒が多く存在している。その後、発達を促進する上昇気流の影響で雲粒は落下せず吹き上げられるため雲の下層部には凝結によってできたばかりの粒径の小さな粒子が多く存在し、上層部では併合過程が活発に働くので大きな雲粒子が多く存在するようになり降水粒子も生成される。この降水粒子は落下を始め下層の雲粒を併合しながら大きく成長する。したがって、Ka バンドレーダで最初に捉えたエコーが LCL よりも高い高度であったことは、雲の下部である LCL 付近に Ka バンドレーダで観測できない小さな粒径の雲粒が多く存在し、それより高い高度で併合過程により成長した比較的大きな雲粒が存在していることを捉えた結果であると推定される。また、積乱雲の成長に伴って観測されるエコーの最低高度が低くなるという結果については、最初に観測した時点では雲粒子の併合があまり進んでおらず、上部の特に併合過程が強く働く高度でのみ Ka バンドレーダによりエコーが観測されたが、時間の経過に伴いそれ以下の高度でも Ka バンドレーダで観測可能な粒径の雲粒子が生成されるようになったことが原因であると推測される。したがって、この段階では必ずしも粒子は

落下しているとは限らない。さらに発達が進むと発生した降水粒子が落下し始めたことで LCL と同程度の高度でも大きな粒径の粒子が存在するようになりレーダ反射因子が大きくなったため X バンドレーダと Ka バンドレーダでエコーが観測されるようになったと考えられる。以上で述べたように Ka バンドレーダでは、X バンドレーダで観測できていなかった雲粒子の生成から降水粒子に至るまでの現象を観測することが可能であるということが確認できた。

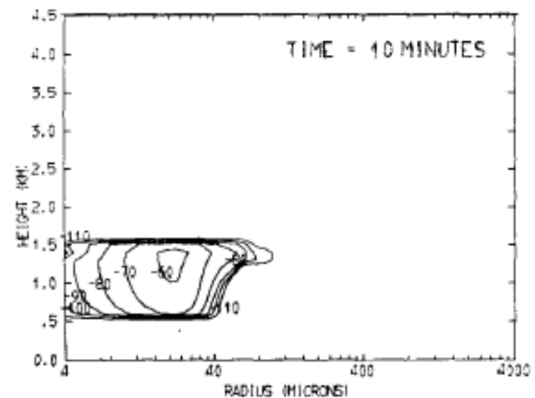


Fig.14 cloud paraticles diameter's dense in 10mintes after cloud generation. (sited from Ogura 1974)

4.3 積乱雲発達の特徴

4.3.1 鉛直構造について

積乱雲は対流が発生することにより大きく鉛直方向に成長を続け強い雨をもたらすため、鉛直構造を解明することは非常に重要である。まず、得られたエコーの高度と観測時刻を利用して雲の鉛直発達速度を算出した。レーダビーム幅の影響により Ka バンドレーダで観測したデータは 30km 先で約 160m 幅の領域の代表値であることに加え、レーダビームが通過する高度に間隔がある (Fig.8

Table 5 Comparison LCL and first echo's height

番号	3	4	6	7	9	11	12
年	2015	2015	2015	2015	2015	2015	2015
月	8	8	8	8	8	8	8
日	5	6	13	13	21	28	28
地上観測時刻	16:00	17:00	16:00	17:00	14:00	15:00	16:00
地上気圧(hPa)	1003	1003.5	1006.7	1006.7	995	994.5	994.3
地上気温(名古屋)(℃)	33.9	32.7	31.5	31.3	29.3	30.2	29.3
露点温度(℃)	23	21.2	23.6	23.2	23.5	23.6	23.5
地上湿度(℃)	53	51	63	62	71	68	71
水蒸気圧	28.1	25.2	29.1	28.3	29	29.2	29
LCL気温(℃)	18.5	17.5	21.2	20.5	20.8	20.9	21
LCL(hPa)	850	845	892	888	895	892	905
LCL(m)	1463	1512	1092	1128	962	986	861
Ka-First Echo	16:05	16:23	14:33	16:13	10:43	14:53	15:04
見えた高度の範囲(m)	3000	1350	1300	1650	1400	1600	1400
	4800	2650	2300	2300	1900	2700	1800
First-Echo - LCL (m)	1513	240	326	811	876	957	757

を参照) ことから PPI スキャンデータにより得られたエコーの最高高度は本来のエコー頂高度と 500m 程度の差があることが想定される。そのため、あくまで概算値として発達速度を算出した。本研究では Ka バンドレーダの一回のボリュームスキャンごとに PPI スキャン画像からエコー頂高度を求め、エコー頂高度差をボリュームスキャン間隔の 10 分で割ることで上昇速度を算出した。鉛直発達速度に関しては Kobayashi et al. (2012) で示されていた値と比較した。Kobayashi et al. (2012) は写真測量やセオドライトにより積乱雲の雲頂高度を求め、その時間変化により鉛直発達速度を精緻に求めた。本研究で求めた上昇速度は各事例において 1m/s から 5m/s 程度であり Kobayashi et al. (2012) の示した 2m/s~15m/s と比べると高い上昇速度ではないもののおおよその値の推定ができていると考えられる。高い値が観測できなかったことは 10 分間の平均上昇速度を算出したことにより、細かな上昇速度の変化を捉えられなかったことによると考えられる。また、可視映像を対象とするカメラやセオドライトでは Ka バンドレーダでは捉えられない小さな雲粒でも雲として捉えられるのでこの差は小粒径のものほど速く拡散していることを表していると推測できる。

一方で、上昇速度の最大値が X バンドレーダのファーストエコーの前後で観測されていることが確認された。このことから雲内部で降水粒子(粒径 $100\mu\text{m}$ 以上)が生成されるころに積乱雲の発達が激しくなるということが推測できる。すなわち、雲内部の粒子の拡大や粒子数の増加が積乱雲の雲頂高度の発達と関係していることを示唆している。また、発達初期の段階で負の上昇速度が算定された。これは、Kobayashi et al. が示しているタレットの振る舞いと関係していると推測できる。タレットは Fig.15 に示す積乱雲の中で約 1km のスケールで見られる塔のような構造のものを指す。このタレットが積乱雲の中で発達衰弱を繰り返しながら積乱雲が発達するので、積乱雲の発達とタレットの成長衰退の関係の重要性が指摘されている²¹⁾。本研究の解析において発達初期段階で負の上昇速度が確認されたのは、タレットが関わっていると考えられる。すなわち、捉えたタレットが衰弱して近くの他のタレットが成長することによってエコー高度が降下したのにも関わらず 10 分毎のボリュームスキャン観測では個々のタレットの衰弱・発達の過程を細かく捉えることができなかったと考えられる。しかし、それでも断片的にタレットの振る舞いが探知できていた可能性がある。タレットが積乱雲の発達に深く関わっているという点から、今後の Ka バンドレ

ーダの積乱雲の初期観測への利用拡大に向けて極めて重要な仮説であり、今後更なる検証が期待される。

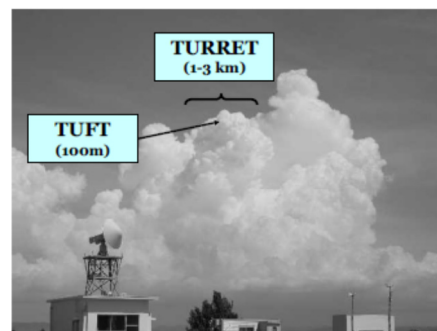


Fig.15 Turret and Tuft. (sited from Kobayashi.2011)

4.3.2 偏波パラメータについて

偏波パラメータのうち ρ_{HV} に関して解析を行った。積乱雲を探知してから ρ_{HV} の値を追跡していくと雲上部において ρ_{HV} が 0.95 程度の比較的低い値であることが確認された。同じ時刻における X バンドレーダの ρ_{HV} は 0.98 以上であり、このことは Ka バンドレーダのみで捉えた特徴である。その後発達が進むにつれて雲上部の高度 5000m 付近の値は高くなり 0.98 以上の値を取るようになった。一方で、高度 2000m 付近では 0.90 程度まで低くなった。その一例を Fig.16 に示す。 ρ_{HV} は水平偏波と鉛直偏波の散乱信号強度の相関関係に依存する値である。散乱体の粒径と散乱断面積の関係を示したグラフを Fig.17 に示す。散乱体積内に含まれる粒子が不揃いであると低い値を取る。この図からレイリー領域では波長に対する散乱体の粒径が大きくなるほど散乱断面積が大きくなり、ミー散乱領域では散乱体の粒径の大きさと散乱断面積が比例関係にはならないことが読み取れる。したがって、ミー散乱領域であると偏波の方向による粒径のわずかな変化により散乱断面積の変動が大きくなるので水平偏波と鉛直偏波の相関関係が低くなり相関係数

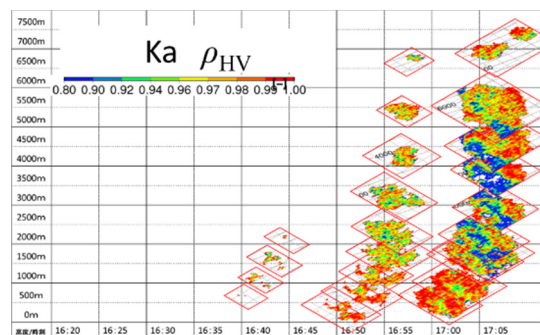


Fig.16 In this correlation coefficient distribution.

が低くなると考えられる。積乱雲の上部で観測された ρ_{HV} の値が低くなるという現象は降水粒子の粒径が大きくなり Ka バンドレーダの波長に対してミー散乱領域になりミー散乱が起こることが原因だと考えられる。このようにミー散乱が発生するような場合における偏波パラメータに関しては、未だ分からない部分が多いため今後更なる解析が必要である。すなわち、現段階では積乱雲における Ka バンドレーダの偏波情報の特徴を捉えることに留まっているが今後これらの特徴が表していることを解明することが必要である。

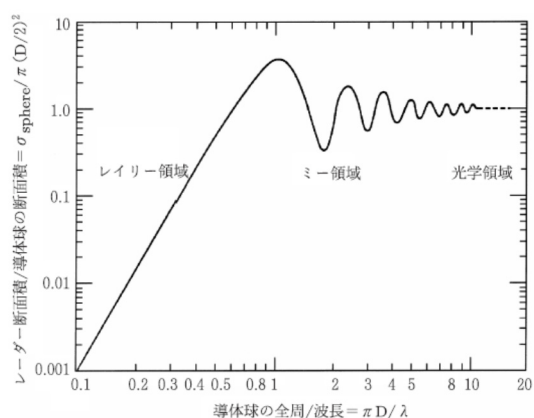


Fig.17 Mie scattering and Rayleigh scattering. (sited from Fukao and Hamazu 2005)

4.4 擬似渦度について

発達する積乱雲ではドップラー風速で算出される擬似渦度（以後、渦度と記す）が必ず高い値を持つことが知られており、これを利用してゲリラ豪雨の早期探知危険性予測が行われている。また、その渦度の高い点が鉛直につながりを持つような渦管の存在が確認されている。これらを参考に積乱雲の初期の Ka バンドレーダでしか捉えられていない段階でも渦度が観測できるのか検証を行った。その際まず、Ka バンドレーダのドップラー風速から算出される渦度について、それが積乱雲の特徴を良く捉えたものであるのか検証を行い信頼できる指標であることを確認した上で解析を行う。

4.4.1 対流性雲の擬似渦度の頻度解析

ドップラー風速から算出された渦度が積乱雲の特徴を示したものであるのかということを確認するために、8月13日15時00分から16時00分に観測された複数の対流性の雲と8月29日19時30分から20時00分に観測された層状性の雲で観測された渦度（Fig.18）の絶対値の頻度分布を作

成し両者を比較した。絶対値を利用したのは今回の頻度解析の目的が対流性の雲の特性を有意に表していると考えられる渦度の強度を求めることであったからである。Ka バンドレーダで観測されたデータから作成した 25m 間隔の格子のうちで $Z_{HH} \geq 5\text{dBZ}$ 以上の条件でそれぞれの雲が含まれるような領域を抽出し、それぞれのメッシュで観測された渦度の絶対値の頻度分布を作成した。渦度の絶対値に関して 0.002/s ごとに区切ったそれぞれの間隔に含まれる格子点データの個数をカウントし頻度分布を作成した。その際、約 3000m から 5000m で強い渦度が観測される（小倉，1997）という知見から観測した高度ごとに渦度の頻度分布にも差異が生じると考え高度 1000m ごとの頻度分布を作成した。また、渦度の頻度の累積分布関数のグラフも作成した。高度ごとに作成した頻度分布（Fig.19, Fig.20）を示す。これらの図よりからどの高度においても対流性の方が高い渦度を持つ割合が高いことが確認できる。また高い高度ほどその特徴が良く確認できた。発達した積乱雲において 3000m 以上の高度において高い渦度が確認されることとよく一致する。また、層状性においても高度が高いところで 0.02/s 程度の値まで取っていることが確認できた。しかし、累積頻度分布関数について層状性の雲では 0.02 以上の生起頻度がすべての高度において 10% 以下であるのに対して対流性のものではすべての高度において 10% 以上であり高い渦度の生起頻度が高いことが示されている。

以上で述べた渦度の頻度分布には空間的に高い周波数のノイズを含んでいるものと考えられるため移動平均を行うことによってそれらを取り除き、より現象の特徴を明らかにした。移動平均は中北ら（2016）が X バンドレーダの観測情報を用いる際に移動平均を 50m 格子に対して 550m 四方で行っていたことに対してレンジ方向の分解能がより高い Ka バンドレーダはより局所的な渦の構造を捉えられるのではないかという仮説から先行研究よりも小さなスケールの 225m 四方

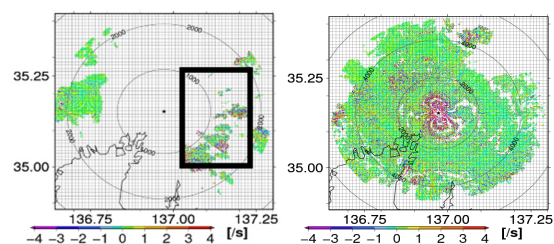


Fig.18 Vorticity distribution in two types of clouds detected by Ka-band radar.

の領域内で単純移動平均を行った．中心メッシュを含め，周囲 9 つすべての格子状メッシュに観測値が挿入されていた場合に限り，その平均値を取り，中心のメッシュに値を挿入した．出力した図を移動平均なしの渦度の図と比較すると，渦度の空間分布がより明確になった．その一例を Fig.21 に示す．

この移動平均を行った渦度に対して先ほどと同様に頻度分布を作成した．その結果を Fig.22, Fig.23 に示す．さらに，累積分布関数を作成し Fig.24, Fig.25 に示す．

によって差があるものの 2000m 以上においては 5%～10% 程度の頻度を有していることが確認できる．したがって，0.02/s 以上の渦度が観測された場合にそれが対流性の特徴を表していると考えることができる．これに従い以後の Ka バンドレーダにおける渦度の解析においては「225m 四方のメッシュで単純移動平均を行った渦度が 0.02/s 以上」である場合を対流性の特徴を表す有意な渦度のシグナルと捉え解析を進めることとする．ただ

し，本研究で対流性の雲中の渦度の頻度解析に用いた領域内にはおよそ 3 つの積乱雲が含まれていることに加えて，1 時間分のボリューメスキャンデータを用いたことで様々な発達段階の積乱雲が混在するサンプルで渦度の頻度特性を求めた．すなわち発達段階ごとに区別できていない．このため様々な発達段階の積乱雲を含んだ積乱雲の代表値として捉える必要がある．積乱雲の発達段階ごとに渦度の頻度の特徴が異なることが想定されるが本研究では，積乱全体を通しての一般的な渦度

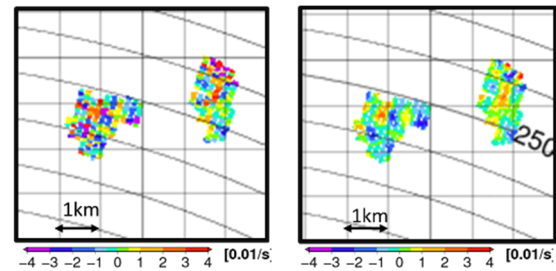


Fig.21 comparison between echos row vorticity and smoothed data. The distribution becomes clearly.

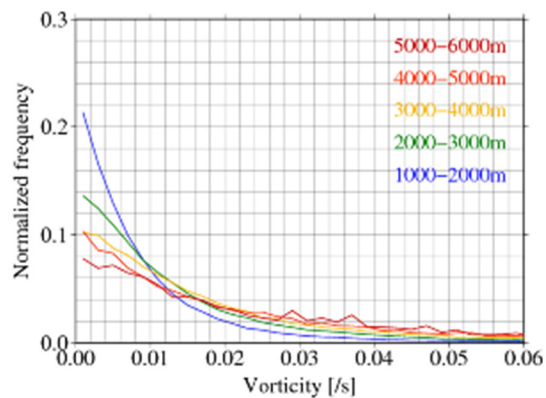


Fig.19 Normalized frequency of vorticity detected in convective cloud.

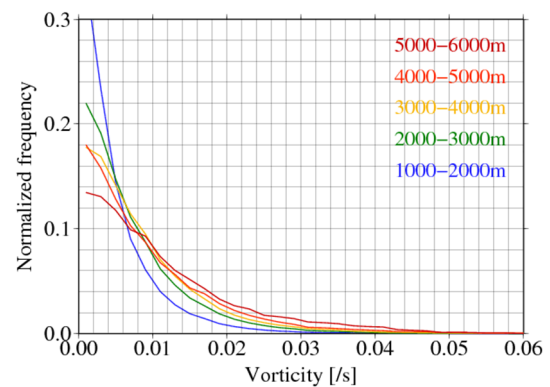


Fig.22 Normalized frequency of vorticity detected in convective clouds after moving average.

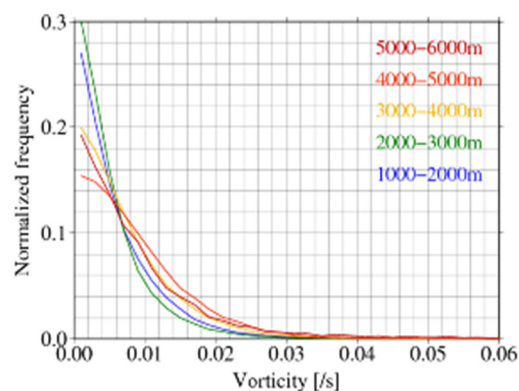


Fig.20 Normalized frequency of vorticity detected in stratiforms clouds.

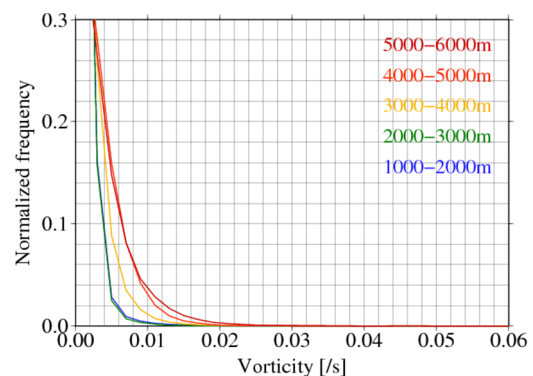


Fig.23 Normalized frequency of vorticity detected in stratiforms clouds after moving average.

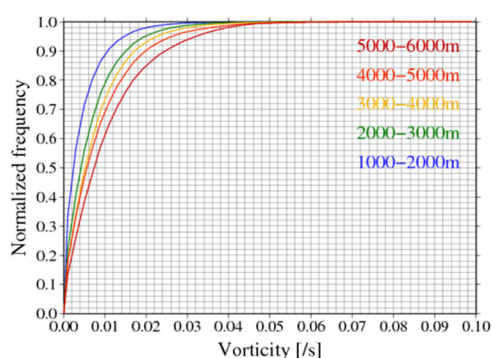


Fig.24 Concentration distribution function of vorticity in convective cloud smoothing liner moving average.

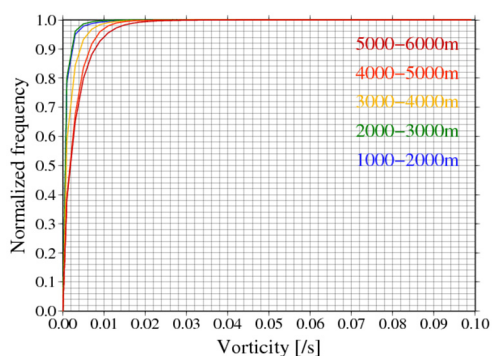


Fig.25 Concentration distribution function of vorticity in stratiforms cloud smoothing liner moving average.

の頻度を求めることで、発達ステージごとの解析は今後の課題とする。

4.4.2 渦管構造に関する解析

中北ら (2016) は発達した積乱雲内部において渦度の分布が鉛直に連なった渦管構造を X バンドレーダで探知し、その発達を追跡した。本研究では Fig.26 に示すように Ka バンドレーダのみで観測することができる降水粒子の生成前の段階で、X バンドレーダでみられるのと同様の渦管構造が確認された。この結果は、雲粒のみで構成される時間帯に

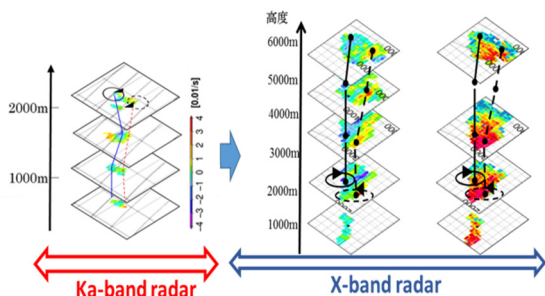


Fig.26 Vertical vorticity tube detected by Ka-band radar and X-band radar.

もすでに渦管が生成され始めていることを示している。

4.4.3 渦度を利用した積乱雲発達危険性予測

現業の X バンドレーダを用いたゲリラ豪雨危険性予測システムにおいて渦度が危険性判定の 1 指標として重点を置かれ利用されている。中北らによる発達する積乱雲には初期段階で必ず渦が存在するという知見に基づき、Ka バンドレーダでゲリラ豪雨のタマゴを捉えた積乱雲 7 事例に対してファーストエコー以降に 4.4.1 で定めた閾値 $\pm 0.02/s$ 以上の渦度が初めて観測された時刻を求め、その時刻を渦度確認時刻と定め記録した。同様に X バンドレーダについても中北ら¹⁷⁾で利用されている渦度の閾値 $\pm 0.01/s$ を用いて渦度確認時刻を求めた。その結果を Table6 に示す。7 事例中 2 事例ではあるが Ka バンドレーダのレーダ反射因子のエコーが確認されてから早い段階でドップラー風速が得られたものについては X バンドレーダで渦度を観測した時刻より 10 分以上早い段階で強い渦度を確認し危険性を予測することができていた。一方で、Ka バンドレーダのドップラー風速の折り返し補正の段階でエコーが多く削られてしまうことが原因で積乱雲初期の弱いエコーの段階でドップラー風速が得られず渦度が得られないという事例が多く Ka バンドレーダでも X バンドレーダと同程度の時刻で渦度を確認していた。早く危険性を判断するためには Ka バンドでしか捉えられていないような弱いエコーの雲の段階でもドップラー風速が得られるようにする必要がある。したがって、ドップラー観測データの処理手法の改善を行う必要がある。今後ドップラー風速が弱いエコー時にも確実に得られるようになれば X バンドレーダで豪雨のタマゴ捉える前に Ka バンドレーダで渦度による危険性の判定を行うことが可能になりゲリラ豪雨早期探知技術が飛躍的に進歩するものと考えられる。

Table6 Comparison in vorticity detection time by Ka-band radar and X-band radar

Year	Month	Date	Detection time (Ka-band radar)	Detection time (X-band radar)	lead time detection (Ka - X)
2015	8	5	4:23.pm	4:42.pm	19 minutes
2015	8	6	4:43.pm	4:47.pm	4 minutes
2015	8	13	2:44.pm	2:48.pm	4 minutes
2015	8	13	4:23.pm	4:20.pm	x
2015	8	21	10:53.am	10:53.am	No lead-time
2015	8	28	3:15.pm	3:27.pm	12 minutes
2015	8	28	3:33.pm	3:41.pm	8 minutes

5. 5 ゲリラ豪雨早期探知への応用可能性の検討

XRAINで使用されているXバンドレーダはPPIスキャンを5分間に約15回行っており、Kaバンドレーダが10分に11回であるのに比べて多く観測している。さらにXバンドレーダは3基のレーダで観測しているため時間的にも空間的にも1基で観測を行うKaバンドレーダよりも密に観測している。それにも拘らず、Kaバンドの方が平均して19分早く観測できていたことはKaバンドレーダの感度の高さや分解能の高さにより積乱雲の初期段階の弱く小さなエコーを捉える能力があることを示したものと言えるだろう。早く探知できることで早く危険を察知することができるだけでなく、積乱雲発達の危険性を判定する時間を長く確保でき正確な予測ができるようになる。さらに、細かな空間分解能を利用した積乱雲の中のタレット等の構造を捉えることによってメカニズムを解明し、危険性予測の精度を向上させるという可能性も期待できる。

ただ、一方でゲリラ豪雨の早期探知への応用の課題も幾つかある。まず強雨による減衰に対する補正やノイズ処理が確立していない点である。Kaバンドレーダの電波はレーダの近くに強雨域が存在すると電波は減衰してしまい強雨域の背後にある情報を捉えることができない。レーダの減衰補正に関してはより減衰の少ないレーダの観測値を利用して補正するという研究が進められており（たとえばZhang, P et al.(2016)）、適切な手法の確立によりこの問題を最小限に抑えることが期待される。また、今回の解析で示されたKaバンドレーダの積乱雲の発生段階の雲を捉えているという優位性を十分に生かし実用化するためには、観測した有意なエコーを除くことなくノイズのみを除去することが求められる。また、観測領域がXバンドレーダの定量観測域が半径60 km圏内であるのに比べKaバンドレーダは半径30 km圏しかないので観測範囲がXバンドレーダの4分の1以下になりXバンドレーダと同程度の観測範囲を実現するにはKaバンドレーダが複数基必要となる。

以上のようにKaバンドレーダが持つゲリラ豪雨探知へ応用することによる精度向上や探知能力の向上などが期待できる一方で、ノイズや減衰に対する補正が不十分であるため、自動で危険性を判定することは現段階では困難でありKaバンドレーダの本来の能力を発揮できない状態である。

しかし、今後減衰補正手法の確立や仰角操作の最適化によりKaバンドレーダを適用することが可能になればゲリラ豪雨探知性能を飛躍的に向上させるものと考えられる。

6. 結論

本論文ではKaバンドレーダの高感度・高分解能の特長を最大限に活かし、積乱雲の初期メカニズムを解明することに加え、ゲリラ豪雨早期探知への応用可能性を検討することを目的としてRHI観測の解析や積乱雲の早期探知から初期の発達メカニズムの解析を行った。Xバンドレーダよりも平均で19分早くKaバンドレーダでエコーを探知できることが本研究でも確認されただけでなく新たに以下の結果を得た。

- ① Kaバンドレーダの探知感度と雲の成長に伴う雲粒子の粒径分布の変化を関連付けた。
- ② 積乱雲の構造の一つであるタレットの発達衰弱の様子を捉えた。
- ③ Xバンドレーダよりも早いステージで積乱雲内部の渦度を捉えた。

結果を得た過程について以下に詳しく述べる。

第1章では、ゲリラ豪雨の危険性予知手法の必要性について述べ、Kaバンドレーダの能力を最大限に生かし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。

第2章では、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^{5), 9)}が行ったゲリラ豪雨のタマゴの早期探知・危険性予知手法とともに、Sakurai et al.(2012)や疋田(2016)の行ったKaバンドレーダによる積乱雲発生の早期探知に関する研究について述べ本研究の目的をより明確なものとした。

第3章では、解析に用いるレーダと、そのレーダから得られる偏波パラメータ情報の示す意味やデータの処理について述べた。解析には、KaバンドレーダとXバンド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。

第4章では、Kaバンドレーダを利用したゲリラ豪雨の早期探知の能力をXバンドレーダによるものと比較を通して検証した。検証の結果、Kaバンドレーダのノイズ除去処理を行っていないものを利用することによって、従来の研究で述べられていたよりも早い段階でファーストエコーを捉え

られることに成功した。この結果は、ノイズ除去手法の改善によって Ka バンドレーダの探知能力をさらに向上させられることを示唆するものである。それと並行して Ka バンドレーダで捉えた積乱雲の発達の初期段階の特徴を鉛直分布や偏波パラメータを用いて解析を行った。ファーストエコーの高度やレーダ反射因子の鉛直分布と LCL との比較を通して一般的に言われているような発生初期の雲物理の現象を Ka バンドレーダの PPI スキャンのデータから読み取れることを示した。さらには発達過程の解析により積乱雲の発達に深く関わるタレットの発達衰弱を捉えている可能性を示し、積乱雲における偏波パラメータについて得られた特徴を述べ今後の研究の必要性を示した。また、過度の頻度解析を通して対流性の過度の特性を示す過度の閾値を定め、7 事例 5 事例ではあるがこれまで確認されていたよりも前の段階で積乱雲の内部に過度が存在していることを示した。さらに Ka バンドレーダのみで観測される雲粒だけで構成されるときに渦管が生成されていることを確認した。これらの結果を踏まえ Ka バンドレーダをゲリラ豪雨の早期探知に応用するための課題となるノイズ処理手法や仰角操作の改善の必要性を述べると共に Ka バンドレーダの応用がゲリラ豪雨の早期探知危険性予測の精度を飛躍的に向上させ次世代のゲリラ豪雨探知足がかりとなることを述べた。

これまでの結果から、今後の課題と展望について述べる。本研究の目的である積乱雲の発生初期のメカニズムを解明するために以下の課題が挙げられる。1 つ目は未発達事例の解析である。本研究では発達する積乱雲に注目し Ka バンドレーダで初期積乱雲の構造を解析した、しかし、発達する積乱雲の特徴を特定するためには発達しない場合も解析し比較することが必要である。両方の雲にどのような差があるのかを解明する必要がある。2 つ目は更なる偏波情報の活用である。本研究では偏波情報に関しては積乱雲の内部の ρ_{HV} の値の特徴を捉えたが、今後は K_{DP} や Z_{DR} などの偏波パラメータの情報も加えて総合的に初期段階の雲粒子の状態を特定することが期待される。また、Ka バンドレーダの短い波長では粒径 3mm 程度の雨粒に対してもミー散乱が発生するため、従来 X バンドレーダ等で使われてきたレイリー散乱のみを考慮した偏波パラメータの特性だけでは理解できない。こうした未だ解明されていないミー散乱発生時の偏波パラメータの示しているものを理解するためには、本研究では活用できなかった沖縄でのビデオゾンデ等による観測のデータを用いるこ

とが有効な手段であると考えられる。3 つ目に Ka バンドレーダでタレットを捉えた可能性があることに関してはカメラ等を用いた観測を合わせて行うことにより検証を行う必要がある。初期積乱雲の解析に用いた PPI スキャンでは得られる情報は鉛直方向に断片的なものとなるので RHI 観測により鉛直方向の構造を詳細に観測し解明することが期待される。4 つ目に Ka バンドレーダで観測された過度と X バンドレーダで観測されている渦管へとの関係を明らかにすることである。発生初期のから発達にいたるメカニズムが解明されることで積乱雲の発達の危険性予測の精度も向上することが期待される。5 つ目にデータ処理手法の改善である。ノイズ処理前のデータから雲を捉えていることが確認されたので Ka バンドレーダでの高感度を最大限に発揮させるために、ノイズの処理手法の改善やドップラー風速の折り返し補正の改善などの基礎的なデータ処理の高度化が Ka バンドレーダの応用に向けた鍵となると考えられる。

Ka バンドレーダの高解像度、高感度の特長を十分に生かしければ積乱雲のメカニズムの解明やゲリラ豪雨探知の精度や探知の早期化が実現できると考えられるため今後の更なる研究が必要となる。以上をもって、本研究の結論とする。

謝 辞

本研究で用いた X バンド MP レーダの観測データは国土交通省からコンソーシアム活動の一環として提供いただきました。同時に、基盤研究(S)15H05765，22226010 の助成をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 小倉 義光 (1997) : メソ気象の基礎理論, 東京大学出版会, 215pp.
- 小倉義光 (1999) : 一般気象学 第 2 版. 東京大学出版会, 308pp.
- 片山勝之・山路昭彦・中村文彦・森田宏・中北英一 (2015) : 局地的豪雨探知システムの開発, *河川技術論文集*, 第 21 巻, pp.401-406.
- 気象庁 (2016) : 気象庁気候変動監視レポート 2015, pp.31.
- 国土交通省 (2009) : 中小河川における水難事故防止策検討 WG 報告書.
- 小林文明 (2015) : ファーストエコー. *天気*, 62, pp.39-540.

- 白石栄一 (2009) : 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.
- 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 (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.
- 中北英一・山邊洋之・山口弘誠 (2011) : 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.
- 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠 (2013) : 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 69 巻, pp.325-330.
- 中北英一・西脇隆太・山口弘誠 (2014) : 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, 第20巻, pp.355-360.
- 中北英一・佐藤悠人・山口弘誠 (2016) : 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 水工学論文集, 第 60 巻, 72.4, pp.199-204.
- 中北英一・佐藤悠人・山口弘誠 (2017) : ゲリラ豪雨予測の高精度化に向けた積乱雲の鉛直渦管生成メカニズムに関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 60 号 B.
- 浜津享助・若山俊夫・渡邊伸一郎・橋口浩之・深尾昌一郎 (2000) : 雲霧観測用 Ka バンドドップラーレーダーの開発. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J83-B, No.4, pp.554-566.
- 疋田丈晴 (2016) : 静止気象衛星と Ka バンド雲レーダーを用いた夏季孤立積乱雲の早期検出, 修士論文, 名古屋大学大学院環境学研究科.
- 深尾昌一郎・浜津 享助 (2005) : 気象と大気のリモートセンシング 京都大学学術出版会, 491pp.
- IPCC 第五次報告 (2013)
- Kobayashi Fumiaki, Akihito Katsura, Yoichi Saito, Tamio Takamura, Toshiaki Takano, and Daisuke Abe (2012) : Growing Speed of Cumulonimbus Turrets, *Journal of Atmospheric Electricity*, Vol.32, No.1, pp.13-23.
- Kobayashi, H., Takano, T. and Takamura, T.(2012) : Isolated cumulonimbus initiation observed by 95-GHz FM-CW radar, X-band radar, and photogrammetry in the Kanto Region, Japan, *SOLA*, 7, pp.125-128.
- Nakakita, E., Sato, H., Nishiwaki, R., Yamabe, H. and Yamaguchi, K. (2017) : 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, 15 pp.
- Ogura. Y, T. Takahashi (1972) : The Development of Warm Rain in a Cumulus Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.30, pp.262-277.
- Sakurai, N., Iwanami, K., Maesaka, T., Suzuki, S., Shimizu, S., Misumi, R., Kim, D. and Maki, Mz (2012): Case study of misoscale convective echo behavior associated with cumulonimbus development observed by Ka-band Doppler radar in the Kanto Region, Japan, *SOLA*, 8, pp.107-110.
- Zhang, P.; Chen, Y. (2016): Attenuation Correction for Ka-band Cloud Radar Using X-band Weather Radar Data. Preprints 16pp.

(論文受理日 : 2017 年 6 月 13 日)