

フェーズドアレイレーダを用いた ゲリラ豪雨発達初期の積乱雲詳細解析

Detailed Analysis on Cumulus Cloud In Early Developing Stage by Using Phased Array Radar

中北英一・高尾充政・新保友啓⁽¹⁾・山口弘誠・中川勝広⁽²⁾

Eiichi NAKAKITA, Mitsumasa TAKAO, Tomohiro NIIBO⁽¹⁾, Kosei YAMAGUCHI, and
Katsuhiko NAKAGAWA⁽²⁾

(1)国土交通省東北地方整備局

(2)国立研究開発法人 情報通信研究機構

(1) Tohoku Regional Development Bureau, MLIT

(2) National Institute of Information and Communications Technology

Synopsis

Localized heavy rainfall which resulting from isolated cumulonimbus often brings severe human and economic damages. Nakakita et al.(2015) developed a prediction system for torrential rainfall using vertical vorticity in a first echo using by X-band Polarimetric Doppler radar. Besides, research on vortex tube structure in guerrilla heavy rainfall has been conducted. Nakakita et al.(2016) showed that with the development of the cumulonimbus cloud, a vertical vorticity structure with positive and negative pairs. Nakakita et al(2017) showed that there is also vertical vorticity structure with positive and negative pairs is generated in early developing stage. In this study, we analyzed the cumulous cloud with higher spational temporal resolution by using Phased Array Radar (PAR). As a result, we succeeded in observing the detail behavior of the vortex tube which cannot be captured by X-band MP radar.

キーワード: ゲリラ豪雨, フェーズドアレイレーダ, 渦度

Key Words: Guerilla-Heavy Rain, Phased-Array-Radar, Vorticity

1. 序論

1.1 研究背景

近年, 都市域で豪雨災害が頻発し, 人的, 物的被害が甚大なものになっている. 災害をもたらす豪雨には台風, 梅雨を始めとして様々なスケールの現象が存在し, その中でも特に狭い範囲で急速に発達する豪雨としてゲリラ豪雨が挙げられる. 2008年7月28日, 兵庫県都賀川において, 突然ゲリラ豪雨が発

生し, 55名が出水によって流され, 5名の尊い命が奪われるという水難事故が発生した. 同年8月5日には東京都豊島区雑司が谷で発生したゲリラ豪雨により地下下水道で作業員6名が流され5名の命が奪われた. 都賀川豪雨の際に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1秒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。

防災のための降雨予測技術の確立に関する研究は長年行われており、台風の進路や前線の位置、組織化された集中豪雨の監視にはリモートセンシング技術が用いられ、特に局地性を持つ現象の監視には地上設置の気象レーダの利用が最も時間、空間的に高い分解能を持ち大いに利用されてきた。しかし、これらの監視、予測の技術をもってしてもゲリラ豪雨による災害を防ぐには充分ではない。なぜなら、これらの監視、予測の技術がカバーできる時間・空間的な規模よりもゲリラ豪雨の規模は小さいからだ。

こうした中で中北ら(2010)によってゲリラ豪雨を起こす危険のある積乱雲を早期探知する研究が進められ、Xバンド偏波ドップラーレーダ(以降XバンドMPレーダと呼ぶ)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。更に中北ら(2013)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XバンドMPレーダを用いた早期探知システムを開発し、それが現在実用化され自治体等向けに配信されている。

1.2 既往研究と研究の目的

ゲリラ豪雨という言葉は「突然の豪雨による急な出水、激流(鉄砲水)により人命が奪われる」という悲惨な災害をもたらす豪雨」といった意味合いで社会的に知られている。しかしゲリラ豪雨という言葉は専門用語ではなく「局地的大雨」「集中豪雨」といった言葉が代わりに用いられることもある。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」というニュアンスを重要視しており、ゲリラ豪雨を「突如出現して、急激に発達し、局所的に強い降水をもたらす、予測困難な災害をもたらす豪雨」と定義した上で、あえてゲリラ豪雨という言葉を用いる。

中北ら(2008)は、Cバンドコンベンショナルレーダを用いて、従来の低仰角のみの観測ではなく立体観測を行うことで、上空にゲリラ豪雨のタマゴを早期に探知できるという研究を行った。その結果、地上付近で降水粒子を探知するより最大で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。このことは国土交通省がXバンドMPレーダのネットワークを導入させるきっかけの一つになった。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示した。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、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(エコー頂高度差を仕官で除した値)、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指標を統合したゲリラ豪雨危険度指数を作成した。さらに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現在淀川ダム統合河川事務所のサーバに実装し、近畿地方整備局、気象庁本庁、大阪管区气象台の他、幾つかの自治体に試験配信している。ゲリラ豪雨の早期探知・危険性判定の技術が社会に実用化され始めている一方、見逃しはほぼないものの危険と判定した場合の空振り率が約2割存在し、今後の更なる精度の向上が期待される。

そして現在まで、早期探知システムの精度向上のために、渦管構造に関する研究が進んでいる。Nakakita et al(2016)はXバンドMPレーダを用いて積乱雲内部にスーパーセルと同じような上昇流による鉛直渦管構造(以下鉛直渦度を単に渦度と呼ぶ)が存在することを示した。Fig. 1の右図はXバンドMPレーダで捉えた渦管の発達の様子を示している。また中北ら(2017)はKaバンド雲レーダ(以後Kaバンドレーダ)を用いて降水粒子が生成される前の段階においても渦管構造が確認されることを明らかにした。Fig1の左図はKaバンドレーダで捉えた渦管を示している。また中川ら(2018)は渦管の出現頻度の指標として渦管の密度を定義し、大気不安定日の組織化積乱雲や線状降水帯による豪雨を早期に探知できることを、フェーズドアレイレーダ(以下PAR)を用いて示した。このように各発達段階の渦管構造に関する研究は大いに進んできている。しかしまだ、渦管の時間発展をつぶさに解析している研究は少ない。本研究ではPARを用いることで渦管構造を時空間的に詳細な解析を行うことが目的である。

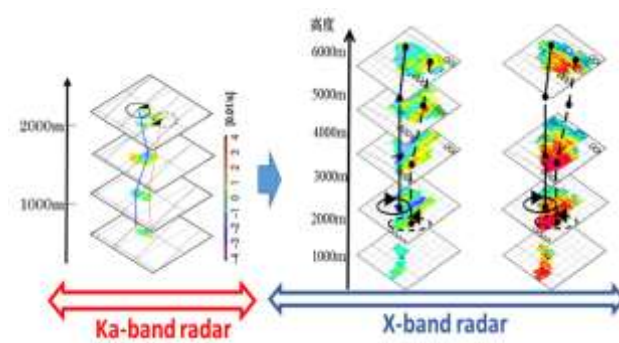


Fig.1 the development of vorticity tube observed by Ka-band radar and X-band MP radar

2. 解析手法

2.1 レーダ諸元

XバンドMPレーダ、PARの各性能はTable 1に、各レーダの位置をFig. 3に示す。XバンドMPレーダは国土交通省が運用している気象レーダである。XバンドMPレーダは名前の通りXバンドと呼ばれる周波数9GHz帯の波長約3cmの電波を利用しており、直径0.1～数mm程度の降水粒子の観測に適している。このXバンドMP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、立体観測がゲリラ豪雨監視に有用であるという結果から、全国で5分毎に3次元観測が行えるような観測スケジュールとなっている。さらに、近畿地方では、Xバンドレーダは、偏波機能が実装されたCバンドレーダ2基と合わせて観測仰角のスケジュールを最適化する事により1分間隔での3次元情報の取得が可能となっている。

また本研究では、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)により開発されたPARを利用した。PARはXバンドMPレーダと同様Xバンド帯を利用しているものの、観測手法の点においてXバンドMPレーダと異なる。XバンドMPレーダが幅1°程度の細いビームを用いて空間全体を機械的に観測しているのに対して、PARはFig2に示すようにファンビームと呼ばれる幅の広いビームを利用することで、高速立体スキャンを可能としている。これによりPARは非常に高い時間分解能を持ち、エコーの時間変化をより密に捉えることができる。また、PARは、ファンビームを利用して空間を粗無く観測しているため、非常に優れた鉛直分解能を持ち、空間的に稠密な観測が可能である。これらの特徴からPARは急発達する積乱雲の構造を時空間的に詳細に解析する事が可能である。

Table 1 Radar specification

レーダ	Xバンドレーダ	PAWR
観測仰角	12	110
波長	3cm	3cm
観測半径	80km	60km
空間分解能	150m/1.2°	100m/1.2°
時間分解能	5分	30秒
主な観測パラメータ	反射強度、ドップラー風速、偏波パラメータ	反射強度、ドップラー風速

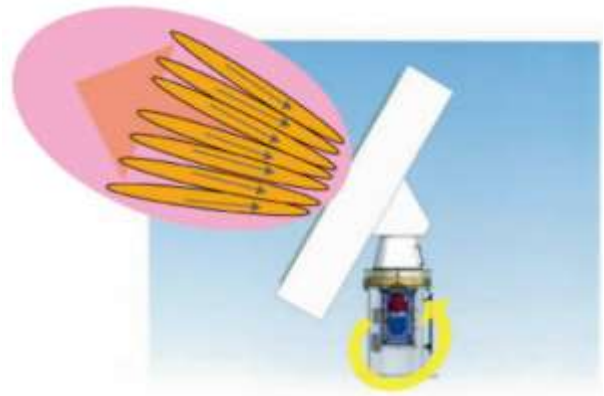


Fig. 2 the fan beam of PAR



Fig. 3 the position of the radars

2.2 レーダから得られる観測データ

(1). レーダ反射強度

レーダから得られる観測データの内、レーダ反射強度について説明する。レーダ反射因子は次の式(1)で表される。

$$Z = \int N(D)D^6 dD \quad (1)$$

ここで、Zはレーダ反射因子、N(D)は粒形分布、Dは粒径を表している。式(1)から分かるように、レーダ反射因子は粒径の関数になっており、雨が激しく降水粒子が大きいほど大きさは大きくなる。

(2). ドップラー風速

XバンドMPレーダ、PARはドップラーレーダであり、ドップラー原理を利用して観測対象の運動を捉える。ドップラーレーダで観測された風速をドップラー風速と呼び、レーダ波長とドップラー周波数によって算出される。ドップラー周波数とは、観測対象が移動することによって、受信信号に生じる周波数の変動である。ドップラー風速 v [m/s]は、ドップラー周波数 f_d [s]、波長 λ [m]を用いて、レーダから遠ざかる方向を正とすると、

$$v = -\frac{\lambda f_d}{2} \quad (2)$$

と表すことができる。

2.3 観測データの処理手法

北半球における鉛直渦度（以後単に渦度と呼ぶ）は低気圧回転（反時計回り）が正の値をとる。本研究では中北ら(2013)と同様に一台のレーダのみを使ってドップラー速度から渦度の算出を行った。直交座標系における鉛直渦度 ζ の定義式は、

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

と表せる。ただし、 u, v はそれぞれの x 成分、 y 成分の速度を表す。これを極座標系 (r, φ) で書き直すと、

$$\zeta = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (r v_\varphi) - \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right\} \quad (4)$$

となる。ただし、 v_r, v_φ はそれぞれ r 成分、 φ 成分の速度を表す。ドップラー風速観測ではレーダビーム方向の風速しか得ることができず、式(4)の右辺第2項の情報しか得ることができない。そこで中北ら(2013)は風速の一方向のみのシアを用いて疑似渦度を利用した。本研究ではこの風速差を2地点の距離で除した値を2倍することで渦度の値とした。すると鉛直渦度は以下の式(5)で算出することができる。

$$\zeta = 2 \cdot \frac{v_a - v_b}{2R} \quad (5)$$

ただし、 $v_a - v_b$ は隣り合ったセル間のドップラー速度差を表す。また、渦度の分布を確認しやすくする目的で移動平均を利用する。中北ら(2013)は極座標系において中心を含め周囲9つの全ての格子に観測値が存在していた場合、9つの値の平均値をとり中心の格子に値を挿入することで移動平均を行った。しかし、レーダビームは広がりを持っているため、レーダからエコーの距離が離れれば離れるほど、アジマス方向の平均分解能が粗くなる。例えば、レーダからの距離が20kmの地点では400mとなり、移動平均するスケールはアジマス方向に両隣を含め1.2kmとなる。これは数百m~1km程度の小さなスケールの渦の解析には不十分であると考えられる。そこで、本研究では直交座標系格子に変換した後に移動平均を行った。

2.4 データの可視化

観測データの可視化手法について述べる。各仰角の全周観測をPPI (Plan Position Indicator) と呼び、PPI データから鉛直方向に内挿して得られた特定高度毎の水平断面データをCAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) と呼ぶ。通常得られたPPI データは鉛直方向に補間され、CAPPI データとして

出力されることが多い。しかし、XバンドMPレーダのデータは5分で1つのデータとして扱われてしまうことや鉛直方向の内挿により実際に存在しないエコーを解析してしまう可能性があるため、本研究で対象とする刻一刻と変化する積乱雲の詳細な内部構造を完全に捉えきれるとは言えない。そこで本研究では、XバンドMPレーダについては、各PPIデータを合成、補間処理を施さずに作成した平面投影図を用い、鉛直方向に110度仰角を瞬時に観測できるフェーズドアレイレーダについてはPPI平面投影図とともにCAPPIデータを利用し解析を行った。

まず、PPI観測データの平面投影図の作成方法を述べる。まず、サンプリングボリュームが格子を十分な数含み、正確な極座標系データを表現できるような格子の大きさを考慮した。アジマス方向の分解能は、XバンドMPレーダ、は約1度、20km離れた地点でのサンプリングボリュームの水平方向の広がりには400mである。またビーム方向の分解能は、Xバンドレーダ、フェーズドアレイレーダがそれぞれ150m、100m、である。そこで、水平方向にXバンドレーダ、フェーズドアレイレーダのデータを50m×50mの格子に投影することで可視化を行った。図3.4に示すように高度 H kmは地球の形状、標準大気屈折を考慮して以下の式(6)~(9)で算出した。レーダサイトからレーダビーム直下の点までの距離を L_d km、経度、緯度方向の距離をそれぞれ x km、 y km、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 R_e km、レーダサイトの標高を h_r km、観測仰角を θ_e rad、大気による屈折を考慮する係数 $k=4/3$ とする。

$$L_d = kR_e \tan^{-1} \left(\frac{r \cos \theta_e}{kR_e + h_r + r \sin \theta_e} \right), \quad (6)$$

$$H = \frac{r \sin \theta_e + h_r + kR_e}{\cos \left(\frac{L_d}{kR_e} \right)} - kR_e, \quad (7)$$

$$x = L_d \sin \theta, \quad (8)$$

$$y = L_d \cos \theta. \quad (9)$$

これらの処理により観測された情報から内挿等を施すことなく平面図に投影できる。また、目視での解析を行いやすくするため、高度の等値線を引き、地表面に1km×1kmの格子線を引いた。

次に、CAPPIデータ作成手法について述べる。CAPPIデータは西脇¹⁴⁾の手法に従い作成した。まず、各時間のPPIデータを式(6)~(9)を用いて水平方向100m×100m、鉛直方向200mの3次元デカルト直交座標系に変換した。また、レーダ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。以上の手法により、反射強度、ドップラー風速、渦度のCAPPIデータを得

ることができる. この CAPPI データを用いて鉛直断面や 3 次元イメージを作成し積乱雲や渦管構造の解析を行った.

3. レンジサイドローブの除去

3.1 レンジサイドローブとは

レーダの観測データを解析する際, Fig 4 に示すようにレンジ方向に強いエコーの前後に筋状のエコーが存在することがある. この筋状のエコーはレンジサイドローブと呼ばれる偽のエコーである. レンジサイドローブは強いエコーが存在するほどレンジ方向の前後に長く現れるため, 偽のエコーの周囲にある本物のエコー領域にも影響が出る. このレンジサイドローブはドップラー速度にも影響を及ぼし, 渦度の解析を行う妨げになる. 本章ではレンジサイドローブと本研究におけるその処理手法について説明する. なお本章を書く際に深尾ら(2005)を参考にした.

レンジサイドローブにはパルス圧縮と呼ばれる技術が関わっている. 観測データの SN 比を改善し観測感度を向上させるためにはピーク出力を上げるか, 送信パルス幅を広げる方法が挙げられる. しかし, 一般的にピーク出力は送信機器の面で制約が大きい場合が多く, パルス幅を広げると距離分解能を下げることになる. パルス幅を保ちつつも観測感度を向上させるための技術がパルス圧縮である. パルス圧縮とは一定の変調を施した長パルスを発射して, 受信する際に復調させることで短パルスとほぼ等価となる観測データを得る技術のことである. この際, 送信波として十分周波数スペクトル幅が広く, かつ周波数スペクトルの位相が揃っていない波を使う. このような波を発射し受信波に対してスペクトルの位相を揃える処理を行うことで, 短パルス幅を発射した時とほぼ同等の観測データを得ることができる. Fig 5 にその際得られる受信波を示す. 得られた信号の特徴として真ん中の大きな信号の周辺に小さな信号の部分が存在することが挙げられる. この信号から大きなエコーの前後に偽のエコーを得ることになり, レンジサイドローブが現れる.

X バンド MP レーダではレンジサイドローブを抑圧する対策が取られている一方, フェーズドアレイレーダにはこのような対策は取られていない. そのためフェーズドアレイレーダの観測データにはレンジサイドローブによる影響が強く表れることになる. 本研究ではレンジサイドローブを取り除くために NICT の佐藤らの手法を参考に除去を行った.

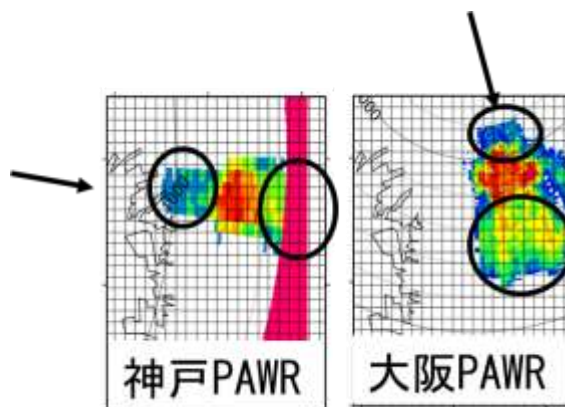


Fig. 4 range side lobe observed by Osaka PAR

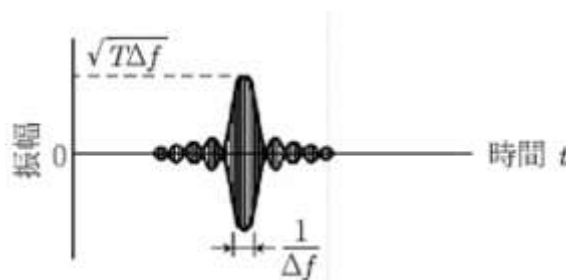


Fig. 5 The receiving wave including range side lobe

3.2 本研究における除去手法

前節で述べたようにレンジサイドローブが強いエコーの前後に弱いエコーとして現れる. レンジサイドローブを完全に除去することは難しいものの, 強いエコーの領域の観測データはレンジサイドローブの影響をさほど受けていないと考えられる. 本研究ではエコーの強い領域のみを抽出しレンジサイドローブの影響を取り除く. レンジサイドローブはパルス圧縮の原理よりパルス幅と光速を乗じた距離の長さで広がるため, この原理に基づき以下の処理を施した. すなわち, レーダからレンジ方向に反射強度が 40dBZ 以上の値で最大になる点からビーム幅分の距離 (低仰角で前後 10.5 km) で, ビーム方向の反射強度の最大値から 20dBZ 以下の値をノイズとして除去する. 以上の処理を施したエコーを Fig. 6 に示す. 以上の処理によって, レンジサイドローブの領域のエコーを取り除き, レンジサイドローブの影響を受けていない部分で解析を行った.

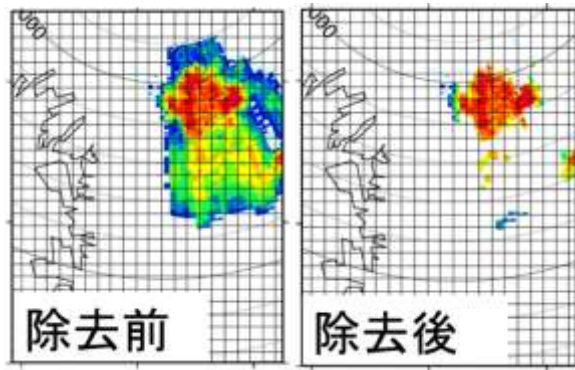


Fig. 6 the radar echo range side lobe removed

4. 高時間・鉛直分解能フェーズドアレイレーダを使った渦管の解析

4.1 解析事例

観測データを用いて話を進める前に、解析する積乱雲について説明する。Fig. 7は大阪 PAR の場所とその観測範囲を示している。解析する際、領域には六甲山がありクラッターの影響が大きく、六甲山がレーダビームを妨げゲリラ豪雨のタマゴの様子の観測ができないことがあるため、六甲山付近に発達する事例を今回は避けた。また、観測領域の端は方位角方向の解像度が粗くなるため、解析事例としては避けた。



Fig.7 the analysis area in this research

4.2 フェーズドアレイレーダを用いた小スケール現象追跡可能性の検討

実際に解析を行う前に、既往研究で使われてきた

XバンドMPレーダとPARの観測データの違いを検討する。2.1章で述べたようにPARはXバンドMPレーダに比べて時間、鉛直分解能が極めて高い。本節では解析事例の14時50分から14時55分までのPPI観測データを用いて、XバンドMPレーダとPARの観測データの違いについて調べる。また、使用するレーダは田口XバンドMPレーダとした。Fig.7で示したように田口XバンドMPレーダは大阪PARから近い位置に設置されており性能の比較が行いやすい。

Fig.8-1とFig8-2は14時50分から14時55分までの観測データをそれぞれPAR、XバンドMPレーダで観測している。Fig8とFig9からPARのデータはXバンドMPレーダに比べて時間方向、鉛直方向共に極めて密であることがわかる。PARは2.1章で述べたように水平方向から鉛直方向まで広がったファンビームを用いて観測を行う。その結果、Fig.8のように膨大な仰角を一瞬のうちに観測することができる上、立体観測を極めて短い時間で行うことができる。このように観測仰角の粗が極めて小さいことから、降水粒子生成初期段階の現象といったスケールの小さな現象を見逃すことなく捉えることができると考えられる。また時間分解能が極めて短いことから、その後の時間発展も十分に追跡できると思われる。

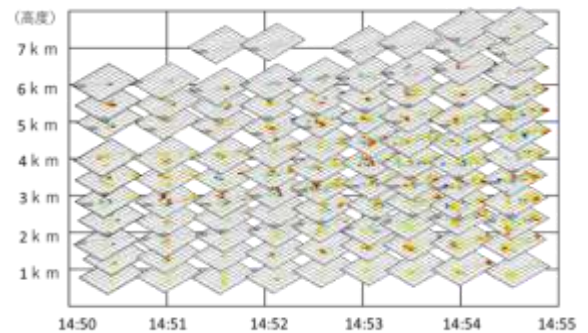


Fig.8-1 the vorticity data observed by PAR

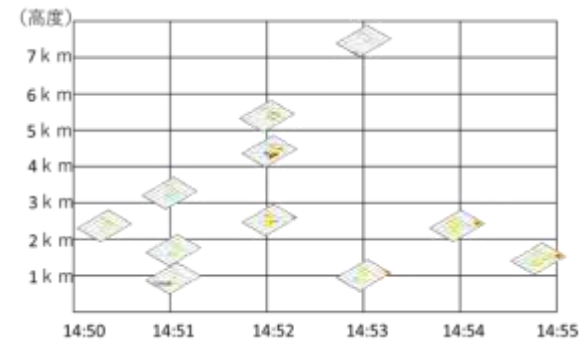


Fig.8-2 the vorticity data observed by X-band MP radar

4.3 高鉛直分解能を生かした小スケール渦度分布の観測

2.1 章で述べたように PAR は鉛直分解能に秀でていいる。本節では PAR を用いて積乱雲内の渦度を調べた。

Fig. 9 は PAR で捉えた積乱雲内の渦度分布の鉛直断面を示している。Fig9 の右図の丸で囲った領域を見ると水平スケール 1km 程比較的小さな渦度分布が鉛直に数 km ほど繋がった渦管構造を捉えていることがわかる。この小さな渦度分布は鉛直に繋がった構造をしていることから、単なるノイズではないと考えられる。ここで、この小さな渦度分布の影響を取り除くために移動平均を水平方向に大きくとると、既往研究の Fig.1 の右図で確認したような大スケールの正負の渦度のペアが確認できる。これは鉛直に極めて密なデータを得らえる PAR を用いることによって、X バンド MP レーダでは十分に捉えきれなかった小スケールの渦度が観測できたと考えることができる。

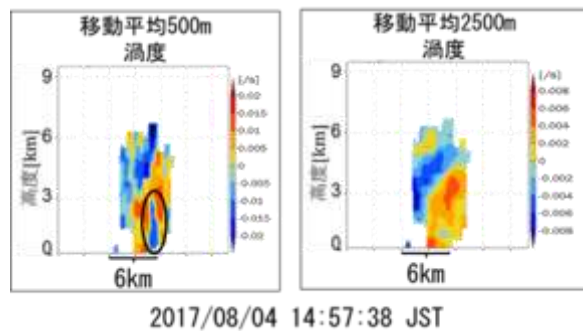


Fig.9 the vertical cross section of vorticity distribution in cumulonimbus clouds

4.4 高時間分解能を生かした小スケール渦度分布の時間追跡

PAR は鉛直分解能だけではなく時間分解能にも優れている。本節では先ほど観測できた水平スケール 1km ほどの小さな渦度分布の時間変化を 30 秒ごとに追跡した。

Fig. 10, Fig11 はそれぞれ小スケール、大スケール渦度分布の 2 分間の時間変化を 30 秒ごとに左から順に並べている。大スケールの渦度は 2 分間であまり大きな変化がない一方で、小スケールの渦度はわずか 2 分間の間に分布が大きく変化していることがわかる。また、時間分解能 5 分の X バンド MP レーダではこの小スケール渦度の時間変化を追跡できない。以上で PAR を用いることで小スケールの渦を細かい時間発展まで捉えることができることを示した。

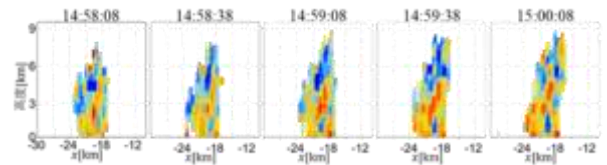


Fig.10 The temporal change of the small scale vorticity.

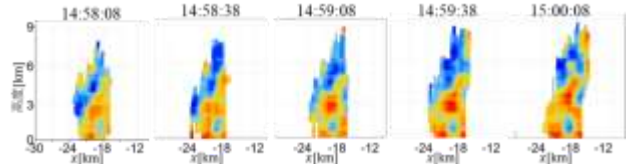


Fig.11 The temporal change of the large scale vorticity.

4.5 積乱雲の発達段階ごとの渦度分布の時間変化

次に積乱雲の発達段階ごとの渦度分布の変化を調べた。Fig11 はそれぞれ降水粒子生成初期、発達初期から成熟期、成熟期から衰退期での小スケール渦度の様子を Fig12 は大スケール渦度の様子を示している。降水粒子生成初期の渦度は分布が小さく、小さな渦度分布のみを捉えることができる。時間が進み発達初期から成熟期になると、小スケールの渦度が組織化を始める。また、移動平均を施して小さな渦度の影響を取り除くと大スケールの渦度が現れる。更に時間が進み成熟期から衰退期になると小スケールの渦度はさらに複雑に組織化し、大スケールの渦は大きくなる。以上から小スケールの渦度は時間が経つごとに複雑に組織化し、大スケールの渦度が発達することがわかる。

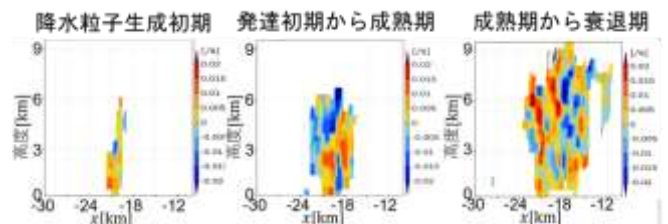


Fig.12 the small scale vorticity at each development stage

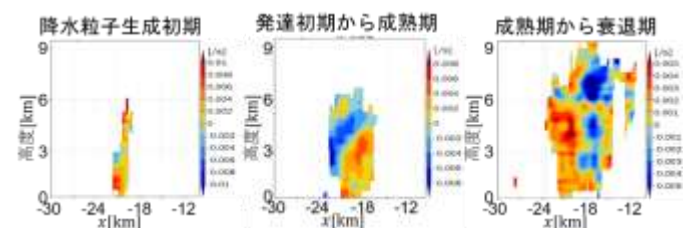


Fig.13 the large scale vorticity at each development stage

5. フェーズドアレイレーダを用いた反射強度の解析

5.1 積乱雲発達初期のタレット構造

本章では渦度だけではなく、反射強度でも小スケールの現象を捉えられると考え高時間鉛直分解能を持つ PAR を使って解析を行った。Fig13 は PAR で捉えた 2 分ごとの反射強度の時間変化を示す。

図 5.1 をみると赤い四角で囲んだ PAR で観測できる 3 つのエコーの塊が上下しながら急激に発達している様子がわかる。この 3 つのエコーの塊は、水平スケールが 2km 程度であり、積乱雲の房であるタレット内の降水粒子を捉えていると考えられる。

以上から時間及び鉛直分解能に優れた PAR を用いることによって、積乱雲の小さな要素であるタレットを捉えているということが出来る。

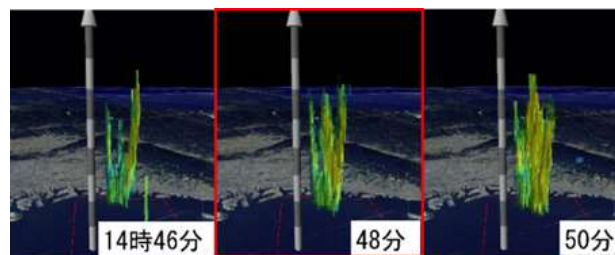


Fig14 the temporal change of radar reflectivity observed by PAR

5.2 タレット内の渦度分布

次に先ほどと同様にタレット内の降水粒子を捉えていると考えられる積乱雲について、内部の渦度分布を調べた。Fig. 15 は 2 つのタレットが時間変化する様子の一瞬間を切り取った図を示す。この後右のタレット②はそのまま勢力が衰える一方、左のタレット①はその後上空 10km まで急激に発達する。左右のタレット内の渦度分布を調べると急激に発達するタレットの渦度分布は、勢力が衰えるタレットに比べて値が高く、鉛直に高く伸びていることがわかる。このことから積乱雲内の小さなスケールの渦度分布が、同様に小さなスケールの現象であるタレットの発達と関連があるとわかる。

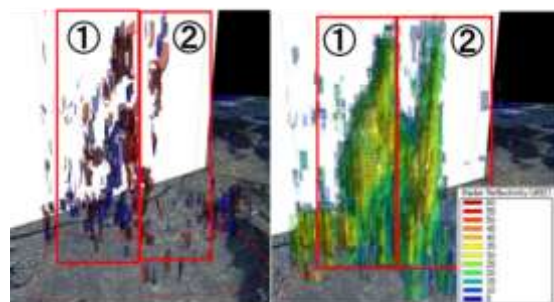


Fig.15 Radar reflectivity and vorticity in the turret

6. 渦管発達に至るメカニズムの考察

以上より、積乱雲が発達するにつれ、小スケールの渦度が激しく動いて組織化し、大スケールの渦度が発達することを示した。また、小スケールの渦度がタレットの発達と関連があることを示した。

このような渦度分布のスケール変化は異なる渦管同士の融合によって生じたものであると考えた。Fig. 16 は渦管構造の時間発展によるスケールの変化を示している。積乱雲の発達ステージが進み正負の渦管が数多く発生し組織化すると、近くの渦管がお互いに混じり合いスケールの大きな渦管として融合する。この渦度の融合の過程については余田(1999)が示したように近接する渦が相互に影響しあい、お互いの周りを回るように変化しながら融合するプロセスにより大きなスケールの渦度へと変化すると考えられる。5 章で捉えた渦度はこの過程を捉えたと考えられる。また、Kobayashi et al.(2012)が、積乱雲の下部構造としてのタレットが生成・消滅を繰り返しながら積乱雲の次の発達段階へと変化していくと示したように、5 章で解析した積乱雲発達初期のタレット内の反射強度、渦管の変動はこの組織化、融合の過程を捉えたと推測される。

以上のように積乱雲が発達するにつれて、渦管の融合化によって渦管のスケールが大きくなっていくことを示した。

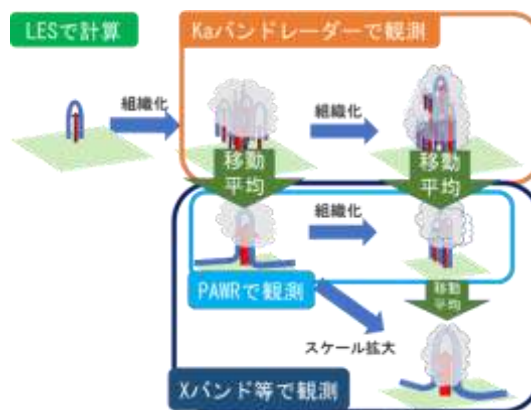


Fig.16 the mechanism of vortex tube development

7. 結論

本研究では、PAR を使って既往研究では捉えきれなかった積乱雲の時間発展をつぶさに解析した。第 3 章では解析の際、問題となったレンジサイドローブの処理について述べた。第 4 章では降水粒子が生成する前段階の発達初期の積乱雲を解析対象とし、時間が経つにつれ、小スケールの渦度が激しく動き、大スケールの渦度が発達することを示した。第 5 章

では PAR を使ってタレットを観測したことを示し、その際渦管が上空に伸び、値は大きく、分布は組織化することを示した。第 6 章では渦管のスケール変化が、渦管融合化によって起きることを示した。将来はデュアルドップラーを用いて推定した上昇流、偏波パラメータ等新しいデータを用いて渦管の更なる研究を進めたい。

参考文献

深尾昌一郎ら(2005): 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会
中川勝広ら (2018): 渦管を用いた局所的豪雨探知手法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_265-I_270
中北英一ら(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 卷

中北英一ら (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.

中北英一ら (2018): Ka バンドレーダを利用した積乱雲生成段階に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_55-I_60

余田成男: 地球流体力学計算機実験集, 1999.

Kobayashi, H et al., 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, 2012.

Nakakita, E., et al.(2017). : Early Detection of Baby-Rain-Cell Aloft in a Severe Storm and Risk Projection for Urban Flash Flood, Advances in Meteorology, p.15

(論文受理日: 2019 年 6 月 17 日)