

報告書概要

技術研究開発課題名	XバンドMPレーダ等の観測技術の活用に関する技術開発
技術研究開発テーマ名	XバンドMPレーダと雲解像モデルによる短時間・極短時間量的降水予測法の開発
研究代表者	
氏名	所属・役職
坪木 和久	名古屋大学 地球水循環研究センター・准教授
共同研究者	
氏名	所属・役職
上田 博	名古屋大学 地球水循環研究センター・教授
篠田 太郎	名古屋大学 地球水循環研究センター・助教
大東 忠保	名古屋大学 地球水循環研究センター・特任助教
尾上 万里子	名古屋大学 地球水循環研究センター・研究員
【1】背景・課題	
<p>ゲリラ豪雨は積乱雲またはその集団によってもたらされる。発達した積乱雲では、上昇流が50m/sに達し、直下の降水強度は1分値では200mm/hrを超える。しかもその発生は大気のおわずかな揺らぎに起因し、発達は分単位といえるほど急激である。このようなまさにゲリラ的に発生する激しい積乱雲の豪雨を、量的にかつ時空間的に精度よく予測するためには、レーダ観測と雲を解像する気象モデル（雲解像モデル）の結合が最も期待される方法である。</p>	
【2】技術研究開発の目的	
<p>そこで本研究開発の目的は、次の2項目である。（1）時空間的高分解能のXバンドMPレーダの情報を最大限に引き出し、雲解像モデルに同化することで、量的高精度な降水の短時間（1～3時間）予測を行う方法を開発する。（2）さらに気象モデルでは予測に間に合わない極短時間（30分程度）の予測をレーダ情報だけから精度よく行う方法を開発する。これらの研究開発の目的について具体的に以下にまとめる。</p>	
（1）短時間量的予測	
<p>まず複数台のXバンドMPレーダから、風の速度場、降水のエコー強度場、粒子情報、粒径パラメータを取り出す方法を開発する。これらの情報を次の2つの方法により雲解像モデルにデータ同化し、降水の短時間予測を行う。ひとつは速度場とエコー強度場を、粒子情報を考慮しつつ3次元変分法により雲解像モデルに同化し、降水予測のための適切な初期値を作成することである。もうひとつは“ナッジング”とよばれる方法で、速度場とエコー強度場、さらに粒径パラメータの4次元データ同化を行う。空間解像度を1～4kmでこれらの初期値化と4次元データ同化を行ったデータにより、3時間の降水予測をリアルタイムで行う方法を開発する。</p>	
（2）極短時間量的予測	
<p>積乱雲のような小規模で極めて激しい現象を、雲解像モデルを用いて予測するためには、高速な計算機を用いても少なくとも1時間程度のリードタイムが必要である。雲解像モデルでは間に合わないこのブランクタイムを、運動学的方法によりレーダのデータだけから予測する。この予測方法においてもMPレーダの情報を最大限に取り出し、“3次元セルトレース法”により30分程度の極短時間の予測を行う。この方法はエコー強度場と風の速度場から検出される対流セルを3次元空間で追跡する方法で、鉛直方向の追跡にはMPの粒子判別から得られる情報を取り入れて降水セルの降下速度を考慮する。本研究開発では、これらの2つの方法を組み合わせることで、30分から3時間程度の時間スケールに</p>	

ついで、時空間的にかつ量的に高精度な降水予測を行う方法を開発する。

【3】技術研究開発の内容・成果

■利用データと雲解像モデル（CRESS）について

本研究開発では名古屋大学地球水循環研究センター所有の2台のXバンドMPレーダ（図1）による観測データを用いる。また、国土交通省のXバンドMPレーダのデータを用いた研究開発を行う。雲解像モデルは申請者が一から開発を進めてきた **CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator)**を用いる。このモデルでは2005年から毎日の気象予測を行ってきている。図2はCReSSによる台風に伴う降水の予報実験の結果である。50mm/hrを超える強い降水も量的に精度よく再現している。さらに民間企業による気象予測への実用化もなされているなど、実気象の予測について多くの実績のある雲解像モデルである。

極めて局地的で急発達するゲリラ豪雨など激しい現象を対象として、これらのXバンドMPレーダと雲解像モデルを用いて、短時間・極短時間予測のシステムを開発する。



図1:名古屋大学地球水循環研究センターのXバンドMPレーダ（Kinレーダ）。

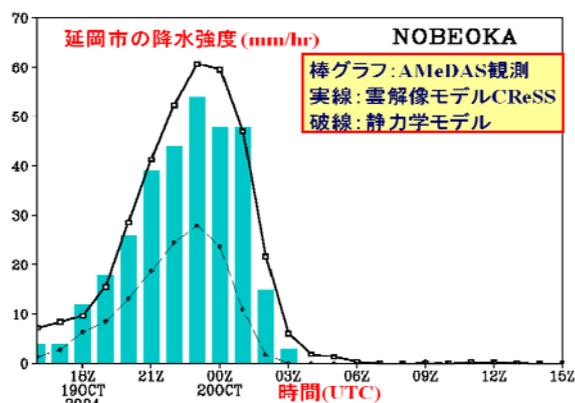


図2:雲解像モデル CReSS による降水予測の観測との比較例。延岡市の降水強度の観測値（棒グラフ；mm/hr）と CReSS（実線）を比較した。破線は気象庁静力学モデルの予測。CReSS（実線）が観測とよくあっている。

■XRAIN-CReSS による短時間量的予測システムの開発

本研究における最も重要な成果は、国土交通省のXバンドMPレーダデータ（XRAIN）をリアルタイムで受信し、雲解像モデル CReSS を用いてそのデータを同化し、実際の豪雨の予測を行うシステムを開発した点である。このシステムでは、データの受信、前処理、予測計算、後処理、さらに結果の表示までのすべてが自動で実行される。

計算領域は当初近畿・東海・北陸で、この地域の9台のMPレーダを同化して予測を行っていたが、最終年度にはこれらに静岡、関東、新潟のMPレーダを加えて15台のレーダを用いた予測を近畿から関東甲信越の領域で実施できるようにした。計算機は研究室の並列計算機システムを用いて実施した。実時間予測が可能で、実際には3時間の予測を行った。このシステムは主なソフトウェアが CReSS3.4m であり、任意の場所にインストールできるように提供可能である。

図3はWebブラウザによる結果表示の例である。左側の画面は予測された降水強度、地上風、そして海面気圧を示す。右側の画面は、反射強度データを同化を行った場合と行わなかった場合の降水強度の差分で、暖色系はデータ同化により降水強度増加を、寒色系は減少を表す。

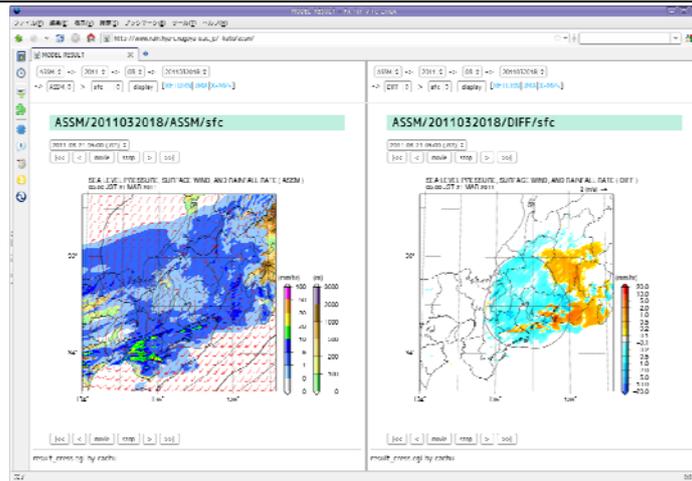


図3 Webブラウザによる結果表示の例

このシステムを用いて近畿地方から東海地方を含む領域を対象として、水平解像度 1km の予報実験を毎日 4 回(または 2 回)長期にわたって実施した。同化の効果を検証するためにこれと並行して同じ計算を非同化で実施した。平成 23 年 12 月までに、それぞれの実験を 400 回以上実施した。

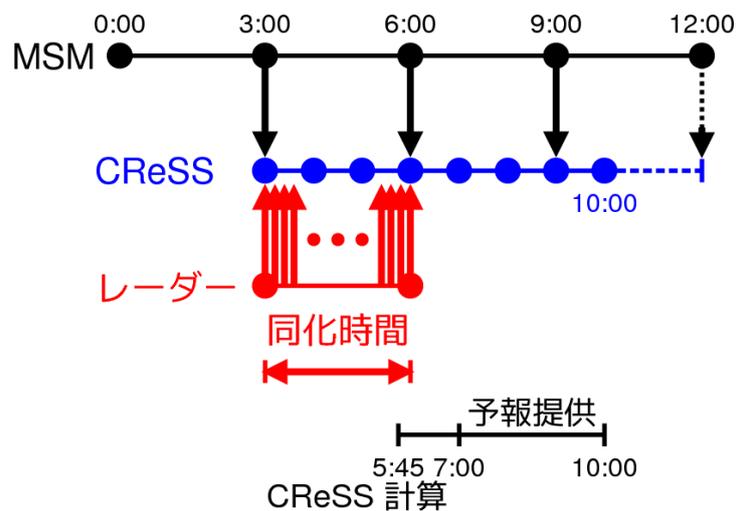


図4 短期気象予測システムの予報サイクル

■XバンドMPレーダデータの同化法

○降水粒子混合比と水蒸気混合比の同化について

豪雨システムの強度と位置の高精度予測を行うためには、MPレーダから得られる情報を時間方向にも雲解像モデルに取り入れることが不可欠である。これは4次元データ同化とよばれ、変分法やカルマンフィルターなどの計算機コストの高いものから、ナッジングなどの比較的軽いものまで様々なものがある。雲解像モデルのような高解像度のモデルでは、計算機コストが非常に高くなるので、実時間の予測のために計算機コストが低く、スーパーコンピュータでなくても実行できる4次元データ同化法が望ましい。ここではそのような同化法としてナッジング法を用いることにした。ここで用いるナッジング法は、観測データを数値モデルに同化する方法として、簡便でかつ効果的な方法で、計算コストが少なくすむという利点がある。一方で、同化できる量は予報変数に限られるという制限がある。

○ナッジングによる降水粒子を考慮した同化法の改良

現状ではXバンドMPレーダデータをナッジングにより同化するとき、反射強度 Z_h または降水粒子の混合比 q を同化している。雲解像モデル CReSS の混合比は、降水粒子を雨、雪、およびあられに区別しているので、それぞれの混合比を同化することが望ましい。その有力な方法として粒

子判別があるが、現状では格子点内の主要粒子 1 種類を推定するもので、実際に起こっていると推定される 2 種類以上の粒子の混合の量を推定できないなどの問題がある。そこで粒子判別法を用いる前にナッジングにより同化法を改良した。

■同化実験のスコアによる評価例

X バンド MP レーダのデータを雲解像モデルに同化することの効果を示すために、多くのレーダを同化した効果を述べる。ここで示す例は、平成 22 年 7 月 15 日、梅雨前線に伴う降水システムによって、岐阜県可児市・八百津町周辺で発生した局地的豪雨である。7 月 10 日から 16 日にかけて、本州付近に停滞した梅雨前線に向かって南から非常に湿った空気が流れ込み、前線の活動が活発となり、西日本から東日本にかけて大雨となった。

X バンド MP レーダのデータをまったく同化しなかった場合(図 5 左)の観測に見られる南西から北東にのびる比較的大規模な降水システムは予報されるが、岐阜県可児市・八百津町周辺で発生した局地的豪雨は、ほとんど予報されていない。このような局地的な豪雨はレーダなどの局地的な場を表現できるデータを用いなければ、多くの場合その強度や位置および発生時刻を予報することは難しい。そこで、まったく同じ計算設定で、レーダデータを同化した場合(図 5 右)、観測された強い降水システムが予報されており、結果に顕著な改善が見られる。時刻や場所だけでなく、50 mm/hr を超えるきわめて強い降水もよく予報されている。このことから、本研究で注目する、局地的豪雨については MP レーダのデータ同化により予測が顕著に改善されることが明らかになった。

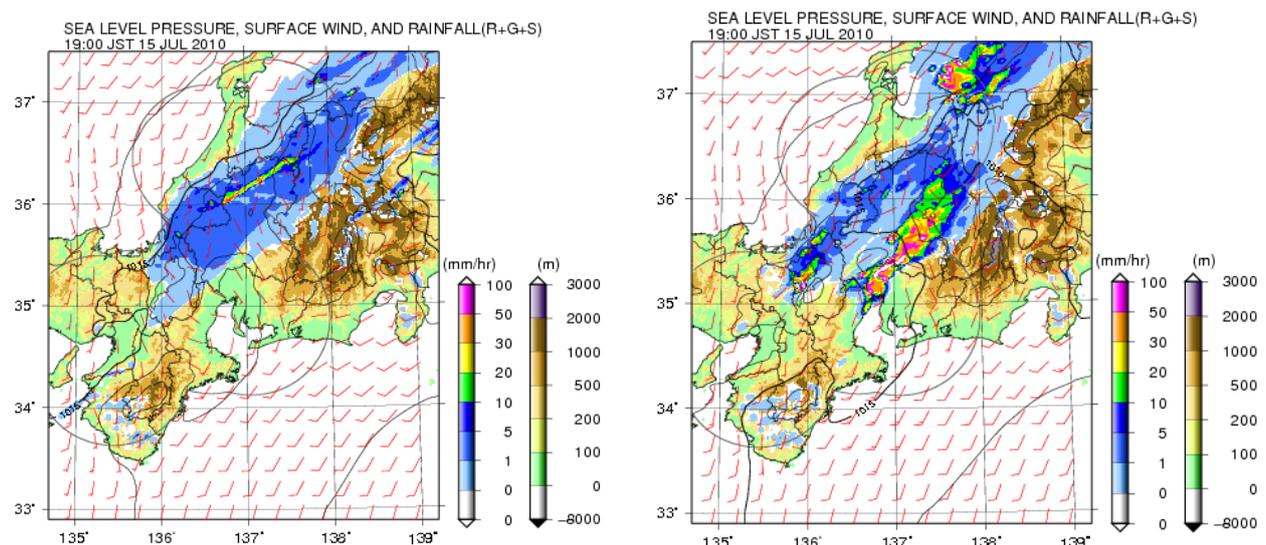


図 5 (右) MP レーダの同化無しの地上降水強度、(左) 近畿・東海・北陸の強度データを同化した地上降水強度

■MP レーダパラメータから降水強度と降水粒子混合比を推定する方法の開発

従来型レーダデータを用いた降水強度や雨水量、氷水量の推定方法では、 $Z = \alpha R^\beta$ という反射強度(Z)・降水強度(R)関係式を用いることが多かった。しかし、反射強度のみを用いて降水強度(もしくは雨水量、 W_r)を推定する場合、雨滴粒径分布が考慮されていないために見積りの精度に問題がある。また、反射強度の減衰が大きい場合も精度に影響をおよぼす。氷水量においては、氷の種類や形状によって、係数が大きく異なるため、反射強度の情報のみから氷水量を求めるのは非常に難しい。

最新の X バンド MP レーダは、従来型のようなレーダ反射強度に加えて、降水粒子の情報(粒径分布や粒子の種類)を偏波パラメータとして取得する。この偏波パラメータを用いることで、レーダデータ(レーダ反射強度, Z_h やレーダ反射因子差, Z_{DR})の減衰補正を精度よく行い、雨滴粒径分布の効果を含めた降水強度(R)および雨水量(W_r)の見積りを精度よく行うことができる。また、偏波パラメータを用いて降水粒子のタイプを推定することで、タイプごとの氷水量(W_i)を求めることが可能である。

そこで、名古屋大学 X バンド MP レーダで観測されたパラメータを用いて、減衰補正を行い、雨滴粒径分布を考慮して降水強度や雨水量の推定を行った。この結果から、MP レーダパラメータを用いて、精度よく降水強度や雨水量を見積もることが可能であることを示した。また、鉛直断面観測(RHI; Range

Height Indicator)データを用いることで雨水量の鉛直分布を推定した。

また、国土交通省によって全国の都市部に X バンド MP レーダ配置され、連続的に 5 分ごとの高時間・高空間分解能で三次元観測が行われている。本研究では、名古屋大学 X バンド MP レーダを用いた雨水量の推定手法を、国土交通省 X バンド MP レーダで観測された MP レーダパラメータの三次元データを用いて、雨水量(W)を三次元的に求めることを試みた。さらに、MP レーダパラメータから推定された降水粒子のタイプを考慮することで、氷水量(W_i)を三次元的に求めることを試みた。

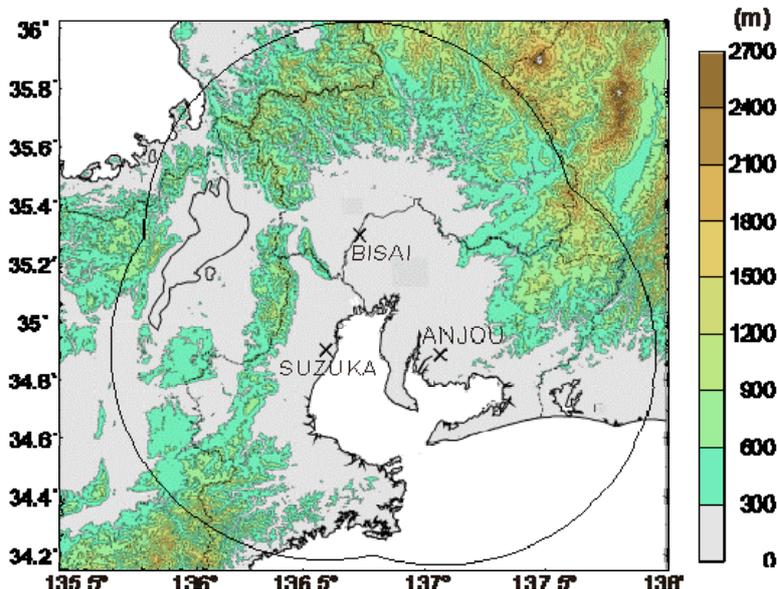


図 6 名古屋域に設置された国土交通省 X バンド MP レーダ(安城、尾西、鈴鹿)の位置(×印)。実線の曲線で囲まれた領域は 3 台のデータによる観測領域を示す。

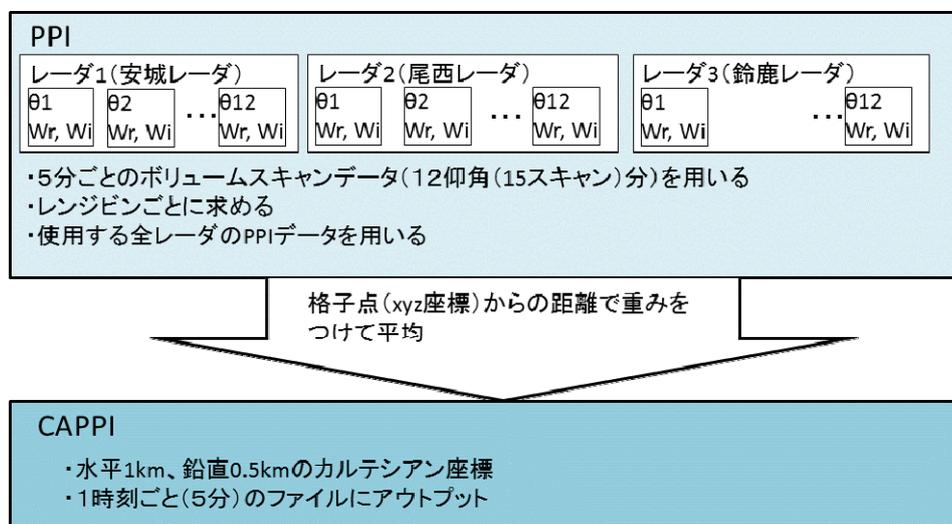


図 7 国土交通省 X バンド MP レーダデータを用いた三次元雨水量(W_r)・氷水量(W_i)推定方法の概念図。 θ は PPI スキャンの仰角を表す。

台風 12 号に伴う降水が観測された 2011 年 9 月 4 日の事例で W_r および W_i の推定を行った。図 8 に 3 台の国土交通省 X バンド MP レーダデータ合成による高度 2 km における Z_h の水平断面図および鉛直断面図を示す。また、3 台の MP レーダデータから見積もった W_r の高度 2 km における水平分布と、鉛直断面図を図 9 に示す。反射強度と W_r の水平断面図を比べると、北緯 35 度、東経 136.6 度付近に見られる反射強度の大きい領域では、 W_r も比較的の大きな値(1.5 g m^{-3} 以上)を示しているのが確認できる。一方、北緯 35.2 度、東経 136.8 度付近では、反射強度が大きな値を示す領域でも、 W_r ではそれほ

ど大きな値を示していない(1.0 g m^{-3} 以下)。これは、大粒の雨滴が存在することで反射強度が大きくなっている一方、雨滴の数濃度がそれほど大きくないために大きな W_r にならないことを表していると考えられる。対照的に、北緯 35.3 度、東経 136.6 度付近では、反射強度が大きくないにもかかわらず、 W_r は大きな値を示す(2.0 g m^{-3} 以上)。これは、小粒の雨滴が多数存在し大きな W_r となっている一方で、雨滴粒径が小さいために大きな反射強度になっていないことを表していると考えられる。鉛直断面図では、雨滴が卓越する領域(気温 0°C 高度以下; 0°C 高度: 4.5km)で、 W_r が三次元的に推定できているのがわかる。融解層付近では W_r は下層より大きな値を示しているが、融解層では雨領域とは異なる散乱をするため、融解層の W_r を求めることは難しい。融解層付近の W_r を精度よく定量的に求めることは今後の課題である。

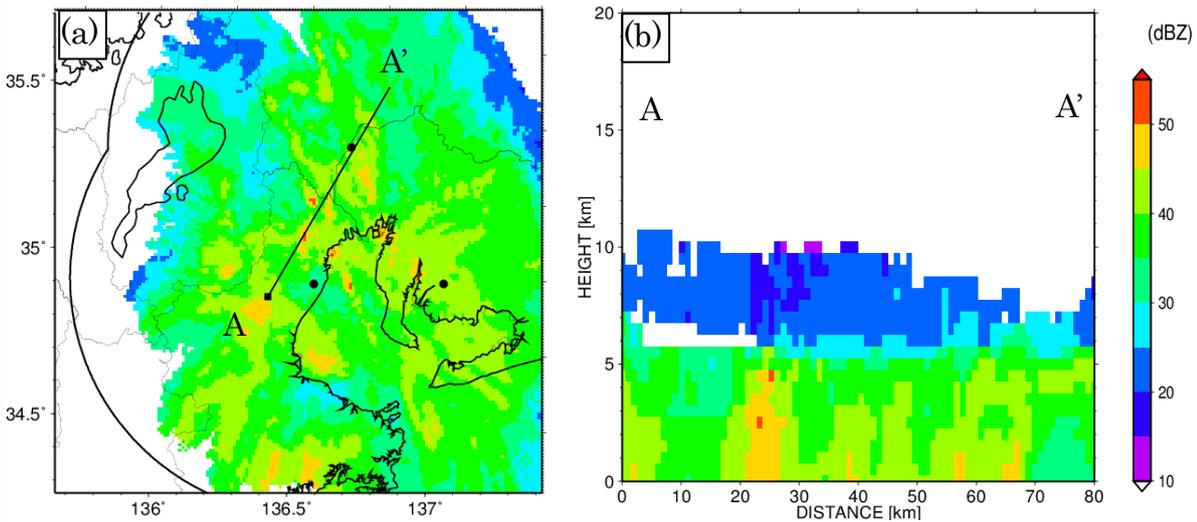


図8 安城・尾西・鈴鹿の国土交通省 X バンド MP レーダを用いた反射強度(Z_h)の合成 CAPPI による、(a)高度 2km の水平断面図と(b)(a)に示す実線 A-A'に沿った鉛直断面図。(a)に示す黒丸は MP レーダの位置を示す。2011 年 9 月 4 日 7 時 20 分の CAPPI を示す。

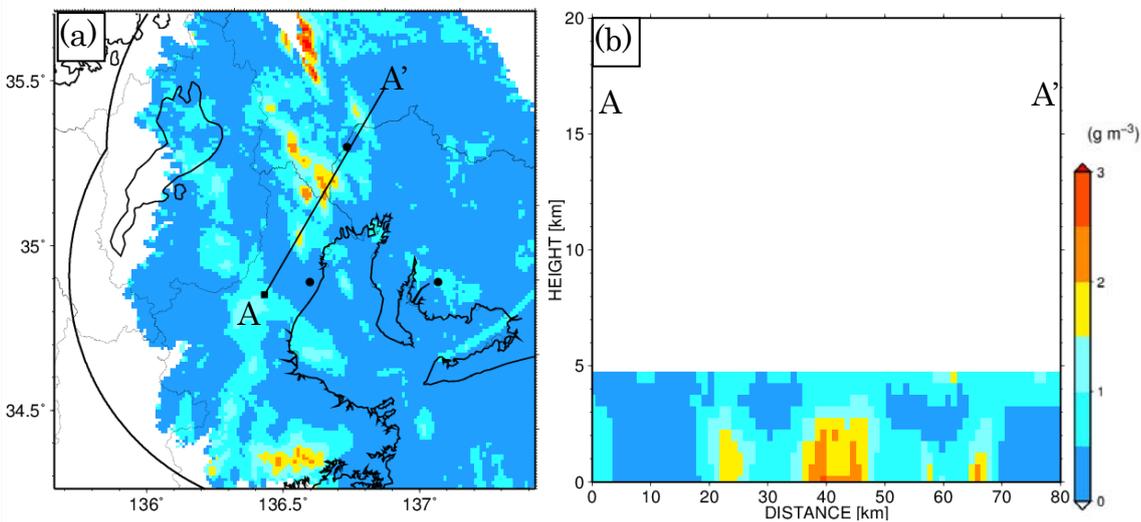


図9 図8に同じ。ただし、雨水量(W_r)を示す。

■粒子判別法の開発

粒子判別は落雷・強雨・突風・降雹等の激しい気象現象のメカニズムを解明し、さらにはこれらの現象を予報するのに重要である。

これまで X バンドの偏波レーダによる粒子判別アルゴリズムの研究は Dolan and Rutledge (2009) で行われているが、これは散乱計算に基づいたものであり、地上もしくは航空機・ゾンデによる現場観測と偏波レーダ観測との同時観測の結果に基づいた X バンド偏波レーダ用粒子判別アルゴリズムの先行

研究は見当たらない。そのため、本研究では名古屋大学のXバンドMPレーダを用いて現場と偏波レーダの同時観測結果に基づいたXバンド偏波レーダ用の粒子判別法の開発を行った。

レーダによる観測では、レーダの動径方向・方位角方向・仰角方向の分解能で規定される領域（サンプリング体積）ごとの情報が得られる。偏波レーダによる粒子判別では、このサンプリング体積ごとに観測された偏波パラメータ（レーダ反射因子：Zhh、レーダ反射因子差：ZDR、偏波間位相差変化率：KDPおよび偏波間相関係数： ρ_{hv} ）の値から降水粒子の種類を判別する。本研究では、サンプリング体積ごとに偏波パラメータの値から粒子判別を行い、各サンプリング体積における主たる降水粒子1種類を定性的に判別することを目的として名大MPレーダと地上の観測データを基にXバンド偏波レーダ用の粒子判別法の開発を行った。

粒子判別法の開発を行う際、以下のような段階を踏む必要がある。

1. 液体降水粒子（雨）と固体降水粒子（雪片・氷晶・霰・雹）の識別
2. 固体降水粒子の種類の特定

液体降水粒子と固体降水粒子を識別するためには、偏波レーダと現場の同時観測により結果を比較・検証する必要がある。夏季において固体降水粒子が存在する高度は通常数km上空であり、現場観測にはゾンデや航空機などの大掛かりな装備が必要となる。一方、冬季においては地上付近でも固体降水粒子が観測できるため、現場観測を行う上で都合がよい。液体降水粒子と固体降水粒子の境界を判別できるかを確認するため、冬季の石川県における名大MPレーダと地上での同時観測事例のうち、雨から雪へと地上降水粒子が変遷した事例の同時観測データを用いた。また、雪片について判別が正しく行えるかを確認するため、名古屋周辺における降雪事例の名大MPレーダ及び地上の同時観測データを用いた。

固体粒子の種類を特定できるようにするためには雪が降っている事例だけでなく、霰が降っている事例についても偏波レーダと現場の同時観測をすることが必要である。固体降水粒子の種類の特定について、本州の日本海側では固体降水粒子として雪に加えて霰が地上で見られ、固体降水粒子の現場観測において非常に条件が良い。今回開発した粒子判別法により固体降水粒子の種類が特定できるか検証するため、石川県における名大MPレーダと地上の同時観測が行われた事例の中から霰が降った事例の観測データを用いた。

また、夏季の雷雲では下層に雨、 -10°C 高度付近に霰、その上空に雪が存在する降水粒子分布が知られており、粒子判別法の有用性を確かめるために名大MPレーダで観測された雷雲に対して粒子判別法を適用し、判別の結果得られる雷雲の内部構造および時間変化が妥当なものかどうか調べた。

○粒子判別法の概要

本研究では近年粒子判別の主流となっているファジー理論を用いた粒子判別法を採用し、航空機観測により検証がなされているLiu and Chandrasekar (2000) のSバンド偏波レーダ用粒子判別法をベースとしてXバンド偏波レーダ用の粒子判別法を開発した。

ファジー理論を用いた粒子判別法では、以下の手順により降水粒子の種類を判別する。

1. 観測パラメータの入力
2. メンバーシップ関数を用いて観測値を変換
3. 降水粒子ごとに可能性を評価
4. 降水粒子の判定

本研究では観測パラメータとしてレーダ反射因子（Zhh）、レーダ反射因子差（ZDR）、偏波間位相差変化率（KDP）および偏波間相関係数（ ρ_{hv} ）と気温の5種類を用いた。偏波パラメータについては名大MPレーダの観測データ、気温については高層気象観測データから推定した高度ごとの気温の値を使用した。また、判別する降水粒子の種類はLiu and Chandrasekar (2000) の判別区分に準じ、霧雨・雨・湿った雪（湿雪：雪片）・乾いた雪（乾雪：雪片）・氷晶・乾いた霰（乾霰）・湿った霰（湿霰）・小さな雹（小雹）・大きな雹（大雹）・雨と雹の混合物（雨+雹）の計10種類とした。

まず、手順1では観測で得られたサンプリング体積ごとに粒子判別で用いる観測パラメータのデータを入力する。入力された各パラメータの値は手順2でメンバーシップ関数を用いて0から1までの連続した値（メンバーシップ値）に変換される。この値の大小が各種類の降水粒子の存在確率の大小に相当する。メンバーシップ関数はパラメータごと、降水粒子の種類ごとにあり、全部で

（パラメータの数）×（判別する降水粒子の種類の数）

のメンバーシップ関数があることになる。図10は本研究で用いた偏波パラメータのメンバーシップ関数、図11は気温のメンバーシップ関数である。例えば図10のレーダ反射因子（Zhh）に注目すると、Zhh

の値が40dBZの場合「雨」と「湿雪」ではメンバーシップ値は1、「乾霰」と「湿霰」では0.5程度であり、他の降水粒子についてはほぼゼロである。これは、Zhhのみから判断した場合には粒子判別を行う格子点にある降水粒子の種類が「雨」と「湿雪」である可能性が高く、「乾霰」と「湿霰」の可能性はそれほど高くなく、その他の降水粒子である可能性はほとんどないことを意味している。

手順3では手順2で判定したパラメータごと、降水粒子ごとに評価された可能性の大小を基に降水粒子の種類ごとの可能性の大小を判定する。この判定にはルール・ストレングス (rule strength) が用いられ、本研究では降水粒子jのルール・ストレングスRS_jは

$$RS_j = \prod_i \mu_{ij}(x_i)$$

を用いた。ここで、iはパラメータの種類 (1 : Zhh, 2 : ZDR, 3 : KDP, 4 : ρ_hv, 5 : 気温) である。jは降水粒子の種類で、μ_{ij}(x_i)はパラメータiの値x_iをパラメータi、降水粒子jについてのメンバーシップ関数を用いて変換したメンバーシップ値であり、0から1までの範囲の数である。

手順4では、手順3で計算したルール・ストレングスのうち、もっとも値が大きい降水粒子の種類をその場所 (サンプリング体積) における降水粒子として判定する。以上がファジー理論を用いた粒子判別法の概要である。

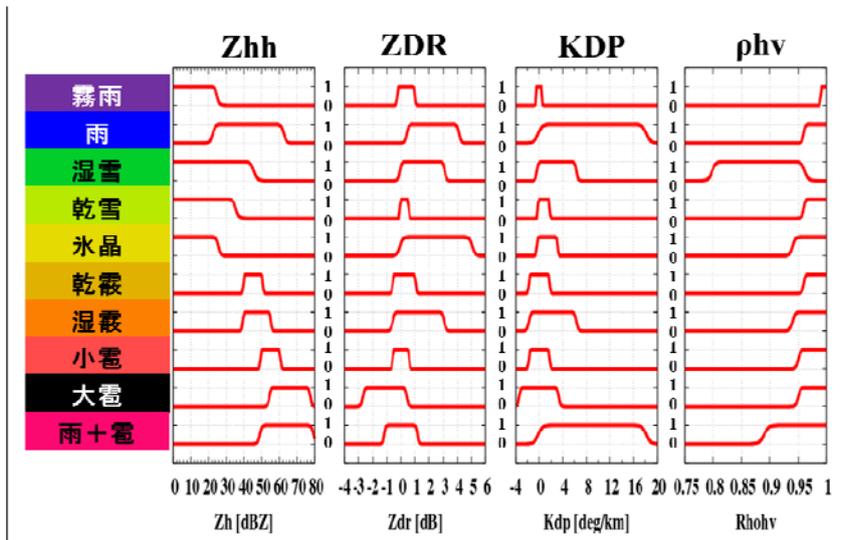


図 10 本研究で用いた各偏波パラメータ、降水粒子のメンバーシップ関数。

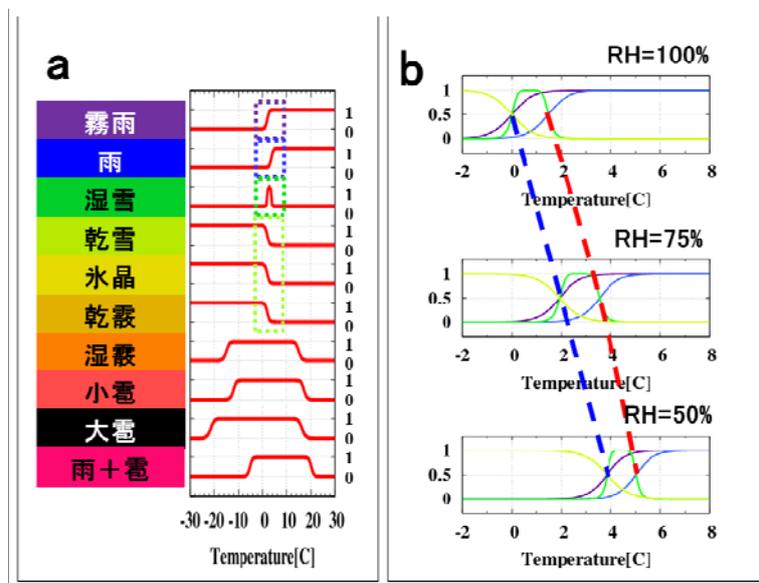


図 11 気温のメンバーシップ関数。(b)中の紫色の実線は霧雨、青色の実線は雨、緑色の実線は湿雪、黄緑色

の実線は乾雪・氷晶・乾霰のメンバーシップ関数である。青い点線と赤い点線はそれぞれ雪片が融け始める気温、完全に融け終る気温 (Matsuo and Sasyo, 1981とMatsuo et al., 1981より近似) を示す。

○判別結果

粒子判別法の有用性を確かめるため、名大MPレーダによって発生から消滅までの全ライフサイクルを観測できた夏季の雷雲に対して粒子判別法を適用し、落雷の極性と関係があると考えられている霰および氷晶の判別が可能か調べた。その際、落雷の位置および極性を知るため、中部電力の落雷位置標定システム (LLS) のデータを用いた。

本研究で解析対象とした2010年7月26日に岐阜県美濃地方で観測された雷雲について、高度2kmにおけるCAPP Iのレーダ反射因子Zhhと、RHIの粒子判別結果を図12に示す。図より、下層に雨、0°C高度周辺に湿霰、その上空に乾霰や乾雪が判別され、さらに雲頂付近には氷晶が判別されていることがわかる。これは良く知られた雷雲内の降水粒子の分布特性と整合的であり、粒子判別法が妥当であることを示している。

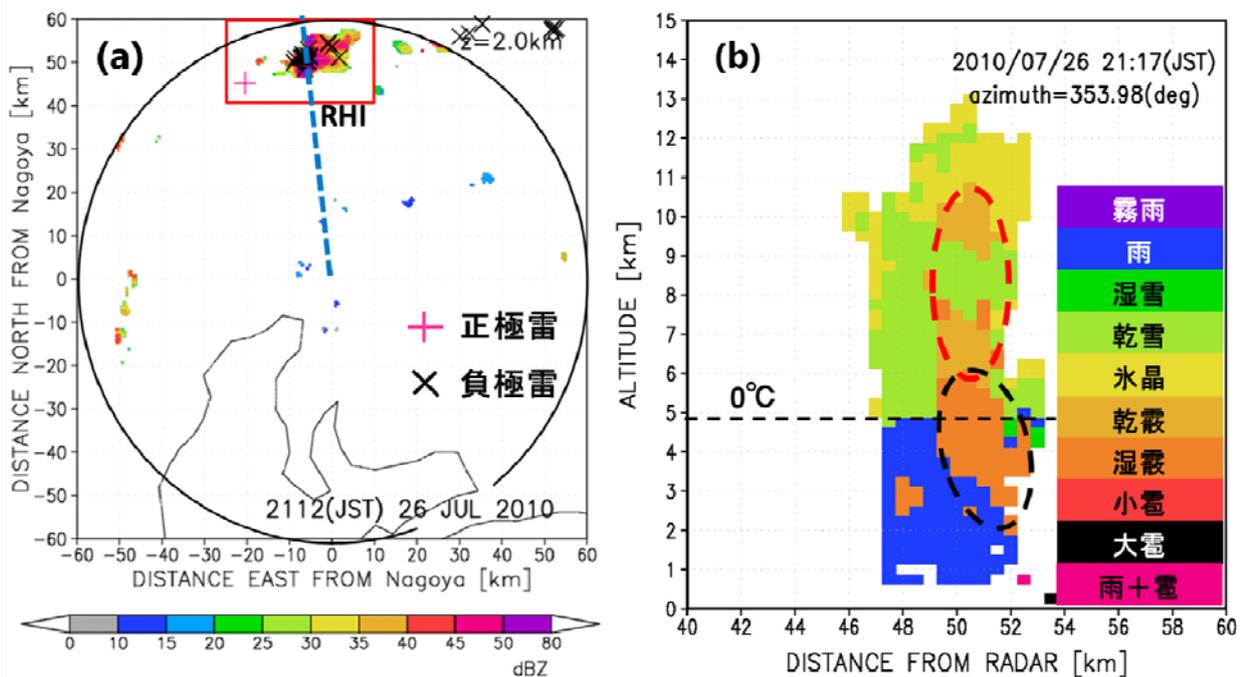


図12. 名古屋大学設置の名大MPレーダで観測された2010年7月26日の雷雲の(a)21時12分における高度2kmのCAPP Iのレーダ反射因子Zhhと(b)21時17分におけるRHIの粒子判別結果。(a)中の赤枠は解析対象の雷雲、赤い十印は正極性落雷の位置、黒い×印は負極性落雷の位置、青色の点線は(b)のRHIの方向を示す。

■極短時間量的予測の研究開発

本研究課題では、3次元的に降水セルを検出する手法とその発達段階(発達期・成熟期・衰退期)を判別する手法を開発している。反射強度の3次元分布から規定される降水セルと鉛直速度の3次元分布から規定される鉛直流セル(上昇流セル・下降流セル)を定義し、両者の重複から降水セルの発達段階を規定する手法を開発した。この手法においては、降水セルと鉛直流セルの重複を判断する閾値の値が重要であることを指摘した。その上で、濃尾平野上で観測された降水システムを対象として、開発した手法を適用して降水セルの抽出、発達段階の判別を行った(大河原ほか 2012)。さらに、検出された降水セルに対して、目視による単純補外法と既存の降水セル追跡アルゴリズムを適用し、降水セルの移動と時間変化の追跡を試みた。

図13に2009年8月9日23時30分に観測された降水システムに、改良を加えた降水セルの発達段階を判別するアルゴリズムを適用した結果を示す。レーダに近い領域においても、降水セルの発達段階が検出されていることが見て取れる。

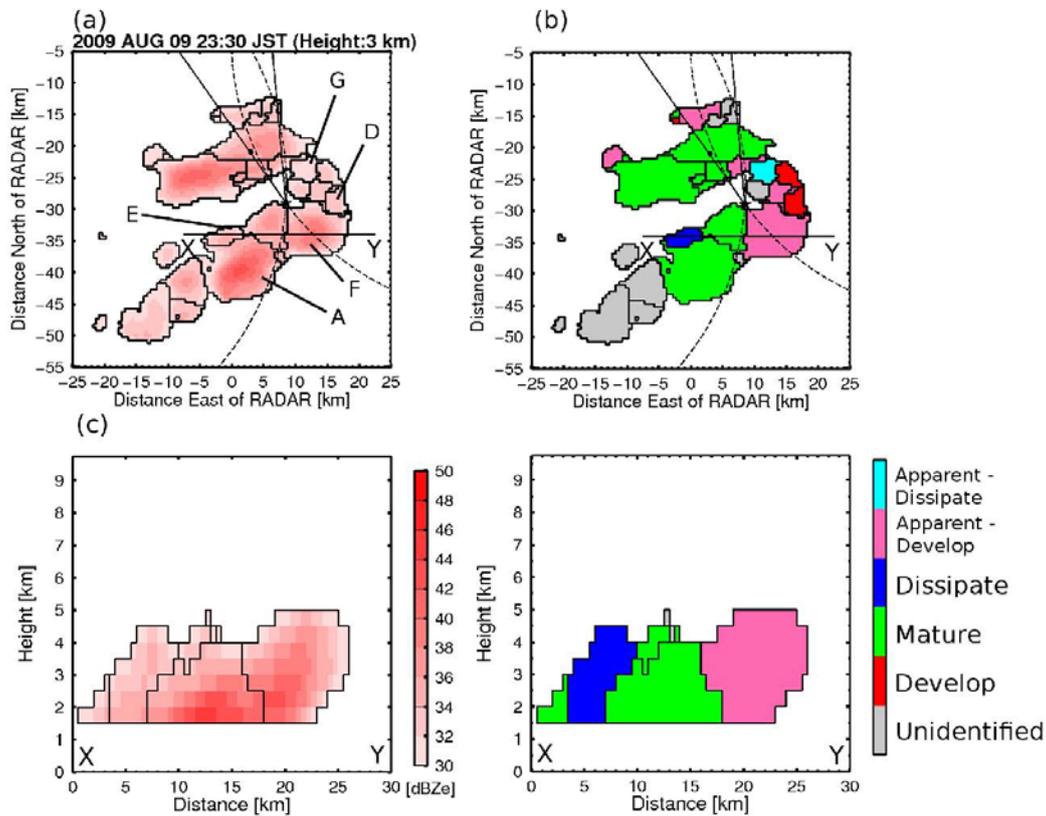


図13. 2009年8月9日23時30分の降水セルの検出結果と発達段階の判別結果。左上図は高度3.0 km における30 dBZe 以上の反射強度と降水セルの検出結果の水平断面図を示す。右上図は左上図で判別された降水セルの発達段階を判別した結果を示す。下図は、それぞれ上図での線分X-Yに沿った鉛直断面を示す。右図において、発達期 (Develop) と識別された降水セルは赤色、見かけ上の発達期 (Apparent-Develop) は薄赤色、成熟期 (Mature) は緑色、衰退期 (Dissipate) は青色、見かけ上の衰退期 (Apparent-Dissipate) は薄青色で示している。鉛直断面セルと連結しておらず発達段階を識別できなかった降水セル (Unidentified) を灰色で示している。

○降水セル追跡法の開発

本研究では降水セルの追跡アルゴリズムとして、最も単純な目視による補外法と Shimizu and Uyeda (2012) により開発された Algorithm for the Identification and Tracking Convective Cells (AITCC) の検討を行う。

補外法の対象としたものは、前述の「発達期」の降水セルから目視によりその後18分間(3ボリュームスキャン)にわたって追跡することのできた6例を対象としている。これらの6例において、最初の6分間の移動ベクトルをその後の時刻に用いた場合に推定される位置と、実際に目視で追跡した降水セルの位置との間の距離を「誤差」として、その時間変化を図14に示した。予想通り、時間の経過とともに誤差は拡大するという結果が得られた。そして、誤差の平均の拡大率は6分間(1時刻分)で約5kmと見積もられた。降水セルの水平スケールは5~20km程度なので、単純な補外法を用いた場合には、10分程度で降水セル1つ分の誤差が生じてしまうことになる。このため、単純な補外法から降水セルの未来位置を推定する手法には問題があると考えられる。

一方、AITCCは、様々な降水監視用レーダシステムにおいて、降水の短時間予測を行うために使用されている Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting (TITAN: Dixon and Wiener 1993) など、先行研究で提案された降水セル検出・追跡アルゴリズムの長所と短所を検討し、より高精度で降水セルの追跡を実現したアルゴリズムである。特に、先行研究では十分な精度を示せなかった降水セルの合流や分離についても検出と追跡を実現したところが利点である。

AITCC は、降水セルの追跡において、2つの連続する時刻の直交座標系の反射強度場のデータを用いる。連続した2つの時刻における降水セルを特定するために、高度3 kmにおける降水セルの面積や位置関係に対して、相互相関法と重複面積を用いた評価法を適用して同一のセルの特定を行っている。最初に、それぞれの時刻における降水セル間の重複面積が最大となるように移動ベクトル（降水セルの移動方向と速度に相当する）を定める。このとき、後の時刻の重複面積が最大となる降水セルは多く検出されるが、これらの可能性のある降水セルのうち、ペナルティ関数が最小となるものから順に優先度を設定していく。そして、優先度が高い順に後の時刻の降水セルの積算面積を計算し、この積算面積が前の時刻の降水セルの面積を超えた段階で、組み合わせの可能性を検討する対象から外す。その後、可能性のある降水セル間の組み合わせに対して移動ベクトルを計算し、移動ベクトルの平均に最も近い組み合わせの移動ベクトルをもつものを、後の時刻における降水セルの位置と決定する。

3次元で検出した降水セルを対象として、高度3 kmの水平断面においてAITCCを適用して降水セルの追跡を試みた結果を示す。図14は、2009年8月9日23時42分から23時54分までの3時刻分のボリュームスキャンデータから計算された高度3 kmの水平断面における降水セルの発達段階の判別結果と、同高度面における追跡結果を同時に示したものを示す。一部の降水セルについては、目視による追跡と比較してAITCCでは不自然な追跡結果を示しており、追跡アルゴリズムの改善が必要であることが示唆される。一方、降水セルのうち23時42分には成熟期、23時48分に成熟期、23時54分に見かけ上の衰退期と時間変化している降水セルも見られる。このような降水セルの時間変化は適切であると考えられる。他の時刻も含めた追跡を行った結果、適切に追跡できている事例と、発達段階の時間変化と追跡結果が合致していない事例の両者が見られた。今後、降水セルの発達段階や降水セルの特徴を追跡の指標に追加することで、追跡アルゴリズムの精度を向上させることが可能であると考えられる。

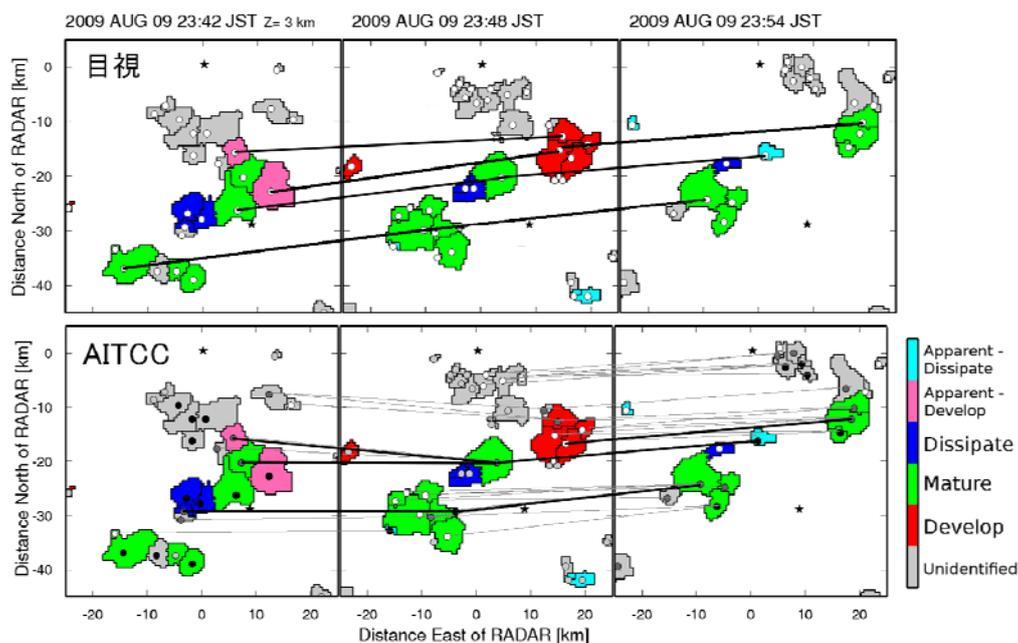


図14. 2009年8月9日23時42分から23時54分まで、高度3 kmの水平断面において降水セルの発達段階の判別と追跡を行った結果。上図は目視による追跡結果、下図はAITCCを用いた自動判別の結果を示している。降水セルの発達段階は図13と同じ色で示している。細い黒実線は降水セルの境界線、太い黒実線は降水セルの連結関係を示す。

【4】今後の課題・展望

本研究課題が始まるより前の2007年に、名古屋大学地球水循環研究センターにXバンド偏波ドップラータイプのマルチパラメータレーダが導入された。そのころはこの技術が国内で実用化され降雨監視が行われるようになるには、20年、どんなに早くても10年以上はかかるだろうと思っていた。それが現在、2012年度の時点で国内のほぼすべての政令指定都市がXバンド偏波ドップラーレーダ網で覆われるに至った。しかも多くの領域は複数台のレーダで観測されている。国内外のレーダ観測網の

発展の歴史をみても、これは真に驚嘆に値することである。この偉業は国土交通省をはじめとする関係各位の多大な努力によるものであり、その導入に関わられた方々には最大限の敬意を表したい。この業績が偉大なものであり、最大限の賞賛を受けるに値するものであるにもかかわらず、一般の国民はもとより、我々を含めた専門家ですえその真価を正当に評価しているとは言いがたい。X R A I Nと名付けられたこのXバンドレーダ網は、世界最速のスーパーコンピュータやiPS細胞の技術と比肩して日本が世界に誇ることでできる技術の一つである。そのポテンシャルはあきらかに我々の想像をはるかに超えていて、現時点ではX R A I Nのポテンシャルのほんの数パーセントしか利用できていないと言ってよい。それほどこのX R A I Nのシステムは価値の高いものである。

様々考えられるX R A I Nの利用目的のなかで、降水の量的評価と量的予測は主要なものの一つである。我々の研究課題ではこれらのうち後者に重点を置いて研究を実施してきた。ゲリラ豪雨と呼ばれるような局地豪雨は、通常の観測網でその初期擾乱を検出し、数値予報モデルに与えて予測することはほとんど不可能である。それ故にこのタイプの豪雨は予測不可能でまさに「ゲリラ豪雨」と呼ばれてきた。X R A I Nはまさにその問題を解決し、局地豪雨を予測可能にするものである。X R A I Nの特長は、時空間的にこれまでにない高解像度の観測データを提供することである。本研究課題ではこの特長を生かし、X R A I Nの観測データを高解像度の雲解像モデルに取り込み、3時間程度先の豪雨予測をすることを目的にして研究を実施してきた。

ソフトウェアとして、本研究課題で開発した数値予測モデルコードは、名古屋大学地球水循環研究センターから提供される。近年の急速なコンピュータの発達には、数値予報をスーパーコンピュータから、パソコンレベルの計算機でも可能にした。ハードウェアとして、ちょっとしたPC群があれば、リアルタイム降雨予測が可能である。そのような時代に配備されたことも、X R A I Nのポテンシャルを高める要因となっている。

しかしながら、X R A I Nの利用は端緒についたところと考えるべきで、X R A I Nのポテンシャルはもっと高いものである。今後もこの研究開発をもとにより高度なX R A I Nの利用を目指した研究開発が強く望まれる。