

称号及び氏名 博士（工学） 妻鹿 友昭

学位授与の日付 2008年3月31日

論文名 「小型広帯域気象レーダの開発ならびに
局地的な降雨と風の観測」

論文審査委員 主査 岡本 謙一

副査 真鍋 武嗣

副査 新井 隆景

論文要旨

近年、集中豪雨や竜巻などによる気象災害が増加しており、これらの現象の予報の重要性が認識されている。気象災害の予報や予知には、局地的な気象現象のデータに基づく数値予報の精度向上が求められている。気象現象のメカニズムの解明は、多くの観測と数値予報モデルを用いて進められる。数値予報モデルの改良には、多くの局地現象の観測データが必要である。これらの現象は狭い範囲で発生し短い時間で消滅するため既存の観測装置では観測が難しく、これまで局地的な気象現象の内部構造を識別できるほど時間・空間分解能が高い観測例は少なかった。それゆえ、これらの局地的な気象現象の観測に適した方法が探求されている。

局地的な気象には、その地域の風の方が大きな影響を与える。このため、上空の風の観測が局地気象の理解のために重要である。また、下層風のみデータであっても数値予報の精度向上に大きく貢献するため、風の鉛直プロファイルの定常観測が重要な意味を持つ。高層の気象データを得る方法の一つにゾンデがある。ゾンデを用いれば下層から高層の風を観測可能であるが、観測には人手がかかるため、観測場所や観測時間が限られる。風を測るレーダである低

層大気観測用レーダ(ウインドプロファイラ)による観測はゾンデの観測よりも人手が少なく、ほぼ無人で常時観測可能である。ウインドプロファイラは大気中の乱流からのエコーのドップラー周波数を観測し上空の風向・風速を測定するレーダである。気象庁は2001年4月からウインドプロファイラを用いて日本の31ヶ所で定常観測を実施している。しかし、大阪にはウインドプロファイラの観測点は存在しない。大阪平野は海と山脈に囲まれており、局地風循環のパターンが特殊である。そこで、ウインドプロファイラを大阪府立大学構内に設置して大阪平野上空の風の観測を行った。

また、局地的な気象現象の影響は狭い範囲に限られるが、様々な災害の原因になる現象がある。例えば集中豪雨、雷、竜巻などである。集中豪雨や雷を引き起こす積乱雲の水平方向の長さは20 km以下であり、竜巻の水平方向の長さは200 m以下である。日本では地上にアメダスなどの気象測器を高密度に設置しているが、それでも約21 km間隔でしか存在していない。そのため、これらの現象を直接観測するのは困難である。日本全国を常時観測している大型気象レーダ群があるが、これらのレーダの空間分解能は低く局地的な気象現象を捉えるのは困難である。局地的な気象現象の観測を目的とした気象の集中観測では、可搬型レーダや飛行機搭載型のレーダなどを用いた観測が行われる。これらの気象レーダは高分解能を持つものも多いが、運用の手間がかかる定常的な観測は行われていない。そこで、局地的な現象を観測することができる高い分解能を持ち、1台でアメダスなどの地上測器よりも広い範囲を観測できる近距離レーダの開発が必要とされている。このため、本研究では近距離レーダの開発を行った。このレーダの開発では高分解能を持ちながら一般のレーダよりも小型で設置する場所を選ばず、無人で常時観測を行うことができるものを目指す。また、開発したレーダを用いて降雨の観測を行い、このレーダの性能の確認とレーダによって観測された降雨の詳細な構造について研究する。

以下に本論文の各章に書かれた内容の概要を述べる。

第1章では、本論文の背景と目的について述べる。

第2章では、大阪府立大学の構内に設置したウインドプロファイラによる風の観測結果について述べる。大阪府立大学構内で1年間以上風の連続観測を行い、大阪の堺市上空の風向・風速の季節変動や日周変動を調べた。また、観測結果を潮岬にある高層気象台のラジオゾンデによる観測結果と比較し、よい一致が得られた。ウインドプロファイラの長期観測により、山と海に囲まれた大阪平野上空の風の特徴を観測することができた。これらのデータは大阪平野の気象現象に対する風の影響を考える材料の一つになるものと考えられる。

第3章では、中心周波数15.75 GHz、帯域80 MHzの信号を送信しパルス圧縮によって高距離分解能を達成する小型近距離レーダである小型広帯域気象レー

ダの開発について述べる。送信信号はパルス中で周波数を 15.71 GHz から 15.79GHz まで線形に増加させる。パルス圧縮にはマッチドフィルタを用いる。パルス圧縮した信号にはレンジサイドローブが現れるが、これを送信信号のパルスの形状を窓関数を用いて変調することで抑圧した。本レーダでは、この窓関数にブラックマンハリスとレイズドコサインの関数形を用いた。ブラックマンハリスを使用する場合には分解能は約 4.4 m となる。本レーダの送信電力は 100 mW , パルス幅は 128 μ s, 1 観測シーケンス(1 秒) に打つパルス数は 128 である。受信信号は I 信号を 200 MHz の周波数でサンプリングをし、12 bit の整数に A/D 変換をした後に記録した。この I 信号からヒルベルト変換を用いて Q 信号を作成し、I 信号とこの Q 信号からなる複素信号に対してパルス圧縮を行った後、位相を用いて降水粒子のドップラースペクトルを求めた。本レーダの較正はディストロメータによって観測した雨滴粒径分布から求めたレーダ反射因子とレーダの距離二乗補正をした受信電力の関係式を最小二乗法を用いて線形の回帰式を求めることによって行った。較正したレーダ反射因子 Z の値から様々な Z - R 関係を用いて降雨強度 R を求めた。その結果, Marshall and Palmer の Z - R 関係を用いて求めた降雨強度は地上のディストロメータから求めた降雨強度と良い一致を示した。

第 4 章では小型広帯域気象レーダを用いた降雨の観測例を二つ示す。一つが非常に強い降雨強度を持つ降雨であり、もう一つがブライトバンドを伴う層状性降雨である。一つ目の観測では同時に観測したマイクロレインレーダの観測結果との比較から、本レーダは降雨の詳細な構造を捉えることができることを示した。この降雨の降り始めに、強いレーダ反射因子を持つ降雨粒子が落下する様子を小型広帯域気象レーダで観測することができた。二つ目の層状性降雨の観測では、強い降雨と弱い降雨が帯状に上下に連なって落下している様子を観測することができた。この時に観測されたレーダ反射因子の鉛直プロファイルの時間変化より観測される降雨の帯状構造の傾きから、本観測における層状性降雨は斜めに傾いて帯状に連なって落下する構造を保ったまま横向きに移動しているものと考えられる。この層状性降雨に現れるブライトバンド内部では降水粒子の落下速度が大きく増加する様子を高い空間分解能で観測した。ブライトバンドのピークの高度は地上気温から推測される高度と一致しているが、ブライトバンドの高度は地上の温度の変動と関係無く変動することを観測した。ブライトバンドの厚さとドップラー速度及びレーダ反射強度との比較を行った。ブライトバンドの厚さはブライトバンド内部における平均落下速度の最大値と相関があることがわかった。

開発した小型広帯域気象レーダは、観測結果から高い分解能を持つことが確認された。同レーダを用いれば積乱雲内部の様子や竜巻などの観測が期待され

る。同レーダは一般の気象レーダよりも高い周波数を用いることから、現業の大型気象レーダに比べ小型化することができる。そのため、これまでの大型気象レーダを設置し難い場所でも設置し観測することが可能となる。現在、本研究で開発したレーダを基に二種類のレーダの開発を進めている。一つ目が、本論文で述べたパルス圧縮を行うと共に、偏波機能が付加されたレーダである。偏波機能が付加されればより正確な降雨減衰補正、降雨強度の推定及び降水粒子の判別が期待される。もう一つは、より高い出力を持ち、アンテナの向きを任意の方向に向け、リアルタイムにパルス圧縮を行い連続観測ができるレーダである。今後、このレーダが完成すれば、観測時間と観測範囲が広がることになるであろう。これらの技術が開発されれば小型広帯域気象レーダを用いた観測によって様々な局地気象現象の理解に役立つデータを得ることができるであろう。

審査結果の要旨

本論文は、気象災害をもたらす局地的な気象現象である降雨と風に注目し、低層大気観測用レーダを用いて大阪府上空の風の連続観測を行うと共に、降雨を高時間・高空間分解能で観測する新しい小型広帯域気象レーダを開発し、同レーダを用いて、降雨構造の詳細を観測することを目的としたものである。得られた主な成果は、以下の項目に要約できる。

(1) 大阪府立大学構内に、低層大気観測用レーダを設置し、1年間以上の風の連続観測を行い、大阪府堺市上空の風向・風速の季節変動や日周変動を調べた。また観測結果を潮岬にある高層気象台のラジオゾンデによる観測結果と比較し、よい一致が得られた。低層大気観測用レーダによる無人の長期連続観測により、リモートセンシング技術の有効性を確認すると共に、山と海に囲まれた大阪平野上空の風系の特徴を観測することができ、これらのデータは、大阪平野の気象現象に対する風の影響を考える基礎データを提供するものである。

(2) 中心周波数 15.75 GHz , 帯域 80 MHz の信号を送信し、デジタルパルス圧縮技術によって高距離分解能を達成する小型近距離レーダである小型広帯

域気象レーダを開発した。同レーダは、2秒毎に、距離分解能 4.4 m で降雨の高時間・高空間分解能な観測を行うことができ、従来の大型の現用気象レーダ網では困難な局所的な気象現象を詳細に観測することができる。同レーダは、I, Q 信号をパルス圧縮した後に、位相を求めて降水粒子のドップラスペクトルを求めている。また、地上の雨滴粒径分布測定装置を用いて観測した雨滴粒径分布から計算したレーダ反射因子を用いてレーダの較正を行い、Marshall-Palmer 等の Z-R 関係を用いて降雨強度を算出し、地上の観測データとよい一致を示した。

(3) 開発した小型広帯域気象レーダを用いて、非常に強い降雨強度を持つ降雨ならびにブライトバンドを伴う層状性降雨の観測を実施した。非常に強い降雨強度を持つ降雨の観測では、同時に観測したマイクロレインレーダの観測結果と比較して、開発したレーダは、降雨の詳細構造を捉える点で画期的な能力を発揮することを実証した。層状性降雨の観測では、帯状の降雨構造の観測を行うと共に、ブライトバンド高度の変動の様子を観測した。また、ブライトバンドの厚さとドップラー速度の比較を行い、ブライトバンドの厚さは、ブライトバンド内部の平均落下速度の最大値と相関があることが分かった。開発したレーダは、気象災害を引き起こす局所的な降雨構造の詳細を観測するのに非常に有効なものであり、その実利用が大いに期待されるものである。

以上の諸成果は、この分野の学術と技術の発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。