

(論文内容の要旨)

本論文は、近年、都市部でも頻発している豪雨に対する予測精度向上を目的として、未だ降雨予測に利用されていない最新型偏波ドップラーレーダー観測情報のデータ同化手法を開発したものであって、全8章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景として、気象レーダー観測情報のデータ同化による降雨予測精度向上の可能性について概述した。特に、近年になってようやく実用化されつつある最新型偏波ドップラーレーダーとよばれる気象レーダーによって得られる降水粒子の量や形態に関する様々な観測パラメータをデータ同化するという世界的に見ても未確立の課題を設定した。

第2章および第3章は本研究の前段であり、まず第2章では、気象レーダー情報のデータ同化に関する既往研究をまとめて、課題を整理した。従来までのデータ同化研究の中心であった変分法にとってかわろうとするアンサンブルカルマンフィルタ法と呼ばれる最新のデータ同化手法について解説し、両手法を比較するために現実の降雨事例に適用した研究がほとんど無いことを述べた。また、第3章では、データ同化する観測値としてどのような選択肢があるのかという視点から、偏波ドップラーレーダーの観測原理について解説した。

第4章では、データ同化手法に着目し、アンサンブルカルマンフィルタ法の特性を理解するために、実際のドップラーレーダーの観測値を比較的簡便な大気モデルによって同化して降雨予測実験をおこなった。ここでは、2003年の近畿地方の前線性の降雨事例を取り上げ、国土交通省の深山ドップラーレーダーおよび城ヶ森山レーダーで得られたレーダー反射因子とドップラー風速を同化した。アンサンブルカルマンフィルタ法で用いる様々な同化パラメータを適切に設定することで、短時間降雨予測精度が向上することを明らかにした。さらに、4次元変分法の結果と比較することで、両者が同等な効果を持つデータ同化技術であることを確認し、開発する演算子の取り替えに対する簡便さという観点から、アンサンブルカルマンフィルタ法が偏波レーダー情報の同化手法開発に有利な手法であることを示した。加えて、誤差の空間相関を考慮しない仮定を施したカルマンフィルタ法とも比較をおこない、考慮しているアンサンブルカルマンフィルタ法の優位性を示した。また、偏波レーダーの観測情報は、大気モデルの雲微物理過程と大きく関係するが、本過程は時間不可逆にもかかわらず4次元変分法のアジョイントモデルは時間遡上性を持つために不整合性があることを指摘し、データ同化手法としてアンサンブルカルマンフィルタ法を導入することを決定した。

第5章では、メソ気象予測を対象として、偏波ドップラーレーダー観測情報の同化を目的としたデータ同化システムを構築した。偏波ドップラーレーダー観測によって、降水粒子の種類判別や降雨粒子の粒径分布に関する観測情報が比較的高い精度で得られている状況にあるため、それらの観測情報を効果的にデータ同化できるように雲微物理過程が詳細に考慮されている大気モデル

CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) を用いた。また、第 4 章で用いたアンサンブルカルマンフィルタ法の 1 種である逐次アンサンブル平方根フィルタ法は、計算機資源的なコストが非常に大いため、実用化を意識して計算効率を高めた局所アンサンブル変換フィルタ法 LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter) を用いた。これによって、メソ気象予測において最先端のデータ同化システム CReSS-LETKF を開発した。

第 6 章では、偏波ドップラーレーダー観測と大気上空を直接撮影することができるビデオゾンデ観測を同期させた降水観測を実施した。これは、世界初の試みである。2007 年 11 月と 2008 年 5-6 月の合計約 40 日間、沖縄県恩納村に滞在し観測データを収集した。加えて、データ同化することで有効に大気状態を推定できるような観測情報として、どのような選択肢があるのかという観点から解析を進めた。その結果、ファジー推論を用いて偏波ドップラーレーダー情報から降水粒子のタイプ（雨、あられ、雪片、氷晶）の判別手法を構築した。さらに、雲微物理過程を含んだ大気モデル CReSS で考慮されているように、より現実に近い識別ができるように、1 種類のための判別手法ではなく複数の降水粒子タイプの混在をも識別できる判別方法を開発した。

第 7 章では、まず、レーダー観測により理想的に観測される仮定して模擬的に作成した固体雲微物理量をデータ同化することで、偏波ドップラーレーダー観測情報の同化による降雨予測への効果を見積もった。その理想実験の結果、一般的なレーダー観測値を同化したときよりも時間的に長く精度向上の効果があることを示した。次いで、第 6 章で実施した偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測結果から、霰粒子の数密度に着目して偏波レーダー観測情報と大気モデルの予報変数を結ぶ観測演算子を構築した。具体的には、氷相雲粒子の中で霰粒子が占める数濃度の割合と第 6 章で開発したファジー推論の評価値に関係があるとして、降水粒子種類に関する観測演算子を構築した。最後に、構築した観測演算子を用いて CReSS-LETKF を実際の降雨事例に適用して、偏波ドップラーレーダーの観測情報のデータ同化による降雨予測の精度評価を行なった。偏波レーダー情報を同化することで、大気の 0 度高度よりも上空の固体雲微物理量（あられ、雪片、氷晶）が現実に近い大気の状態となり、モデルの初期値問題が改善されるようになった。加えて、従来までのレーダーで観測できるドップラー風速値やレーダー反射強度と組み合わせてデータ同化することで、短時間降雨予測精度が向上することを示した。

第 8 章は結論であり、各章で得られた成果について要約するとともに、本研究によってようやく偏波ドップラーレーダー情報のデータ同化へのブレークスルーが果たせたことを示し、加えて今後のさらなる発展への課題について整理した。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、都市部でも頻発化している豪雨の予測精度向上を目的として、未だ降雨予測に利用されていない最新型偏波ドップラーレーダー観測情報のデータ同化手法を開発したものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. レーダー観測情報のデータ同化による短時間降雨予測において、データ同化手法としてアンサンブルカルマンフィルタ法を導入し、実際のドップラーレーダー観測値を同化するための様々な同化パラメータを設定することで、予測精度が向上することを示した。さらに、最も高度な範疇のデータ同化手法とされる4次元変分法による予測結果と比較することで、アンサンブルカルマンフィルタ法が実用的に4次元変分法と同等であると明らかにした。
2. 偏波ドップラーレーダー観測値の同化を目的としたデータ同化システムの基礎を構築した。すなわち、雲微物理過程が詳細に表現されている大気モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator)、データ同化手法として計算効率を高めたアンサンブルカルマンフィルタ法である局所アンサンブル変換フィルタ法 LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter) を結合して、データ同化システム CReSS-LETKF を構築した。
3. 世界で例のない、実験用のCバンド最新型偏波レーダーと直接大気上空の降水粒子を撮影するビデオゾンデとの同期観測を実施した。さらに、得られた観測結果をベースに、データ同化の観点から、偏波観測情報のみから大気モデルで表現する降水粒子の種類(雨、あられ、雪片、氷晶)への判別手法を、ファジー推論を用いて構築した。さらにより現実に近い識別ができるように、ファジー推論の特性を活かして、複数の降水粒子タイプの混在状態も識別する判別方法を開発した。
4. 雲微物理過程を通して偏波レーダー観測情報のデータ同化演算子を提案し、実際の降雨事例に適用した効果を評価した。特に、雲微物理過程を含んだ大気予測モデルで考慮されている降水粒子の混在具合に関し、レーダー観測情報から算定されるメンバーシップ関数値から降水粒子の存在比(数密度比)を推定する手法を提案することにより、予測モデル変数と観測値間の演算子に関するまったく新しいアイデアを示した。また、実際の降雨事例に適用した結果、大気の気温0度層より上空における霰や氷晶などの雲微物理量の推定精度が向上することを明らかにし、これまでよりもリードタイムを長く精度を維持する降雨予測が可能であることを示した。

本論文は、最新型偏波ドップラーレーダーによる観測情報のデータ同化手法を開発することによって短時間降雨予測精度の向上を示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。