

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	川 畑 拓 矢
論文題目	Assimilation and Forecast Studies on Localized Heavy Rainfall Events Using a Cloud-Resolving 4-Dimensional Variational Data Assimilation System		

(論文内容の要旨)

20 世紀中葉以来、コンピュータおよび全球気象観測の飛躍的發展とともに数値予報モデルおよびその初期値作成法は大きく発展し、数時間から数か月先までの天気予報は観測された初期値からの時間積分結果に基づいて行われる時代となった。なかでも初期値作成法は、数値予報結果と観測データの両方の情報を同時に取り扱うようになり、かつそれらの誤差を考慮することで、データ同化法として発展してきた。これらの数値予報システムの高度化に伴い、今日では 100~1000 km 規模の大雨は比較的精度よく予報できるようになったが、1~100 km 規模の局地豪雨の数値予報は未だ挑戦すべき研究課題として残されてきた。

申請者は、水平規模が 10 km オーダーのメソ対流系によって引き起こされる局地豪雨の研究を行う第一歩として、雲を解像できる 4 次元変分法データ同化システム NHM-4DVAR を開発した。これは、気象庁非静力学モデル (NHM) に基づく非静力学方程式系準拠の 4 次元変分法データ同化システムである。申請者は、まずそれまでに開発された NHM の力学部分の随伴モデルを用いて水蒸気移流の摂動を含むように拡張し、かつ雲解像システムとして運用するための制御変数の設計などを行って NHM-4DVAR の第一バージョンを完成させた。次に、このデータ同化システムに雲水と雨水に対する摂動を含む温かい雨の雲物理過程を導入し、水物質に関する制御変数を追加して NHM-4DVAR 第二バージョンを完成させた。この間に、さまざまな先進的な観測データを同化するための観測演算子を開発して、各バージョンに組み込んできた。第一バージョンには、ドップラーレーダー動径風、GPS 可降水量、地上観測データの同化が実装された。また、第二バージョンには、レーダー反射強度の直接同化が実装され、さらに GPS 視線遅延量の観測演算子が新たに組み込まれた。

これらの開発の結果、NHM-4DVAR は、i) 多くの物理過程を備えた非静力学モデルに基づいて、ii) 水平分解能 2 km の高解像度でメソ対流系を陽に表現し、iii) 多種類のリモートセンシング観測網に対する観測演算子を備えた、世界最初の雲解像 4 次元変分法データ同化システムとなった。申請者は、このシステムを以下の 3 つの局地豪雨事例に応用し、メソ対流系の予測可能性を調べて、その発生・維持メカニズムの研究を行った。

まず、NHM-4DVAR 第一バージョンを用いて、1999 年 7 月 21 日に東京北部の練馬で発生した孤立メソ対流系による局地豪雨の事例研究を行った。その発生期に対してドップラーレーダー動径風、GPS 可降水量、地上気温・風の観測データを加えて同化し、数値予報実験を行った。水平規模が 50 km 程度のメソ対流系は、同化ウィンドウとそれに続く予報の中で、10 分間降水量およびレーダー反射強度の観測値を検証対象として非常に良く再現された。この結果は、発生期に適切な観測データを同化できれば、10~100 km の小さな規模のメソ対流系でも、発生時刻、場所、強度を特定して正確に予測できることを示すものである。

次に、NHM-4DVAR 第二バージョンを用いて、2005 年 9 月 4～5 日に発生した杉並豪雨の事例研究を行った。ドップラーレーダー反射強度を新たに加えてデータ同化し数値予報実験を行ったところ、観測と類似した強度と形状を持つ線状降水帯が再現された。レーダー反射強度の同化は、この降水帯の強度を強め、偽の対流を抑制し、降水量予報スキルを改善することがわかった。再現された降水帯はさらに後の数値予報において 1 時間持続し、やがて徐々に衰弱したが、このメソ対流系の予測可能性の延長に対して線状降水帯西側の北風に起因する下層収束の持続が鍵となっている事を結果の解析により明らかにした。また、雨水の同化は長時間持続するメソ対流系の予報の改善に対しては限界があることを、一連の予報実験から結論づけた。

さらに、メソ対流系の環境場の推定を向上させるために GPS 視線遅延量の同化手法を開発し、2009 年 8 月 19 日に沖縄本島で発生した線状降水帯による那覇豪雨事例に応用した。GPS 視線遅延量同化は、広い領域における水蒸気と気温場を有意に改善し、降水の発生時刻と強度の予報の改善に大きく寄与することを示した。この結果は、メソ対流系の環境場情報の同化がその予測可能性を高めうることを示すものである。

これら 3 つの事例研究を通して、対象となったメソ対流系は水平規模が 50 km 程度の湿潤な下層大気の収束によって発生しており、この規模のメソ対流系の予測可能性は対流周辺 50×50km 程度の下層領域の風、水蒸気、気温の密な観測データの同化に依存していることを明らかにした。また、積乱雲内部の雨水の同化だけでは、長時間持続するメソ対流系の予報を改善するうえで限界があると結論づけた。

(論文審査の結果の要旨)

数値天気予報システムは、過去半世紀以上にわたるコンピュータおよび気象観測技術の飛躍的発展とともに精緻化・高度化され続け、今日では総観規模の大雨は比較的精度よく予報できるまでになってきたが、水平規模が1~100 km程度の局地豪雨の数値予報は重要な挑戦課題のひとつとして残されてきた。申請者は、気象庁・気象研究所の領域気象数値予報システム開発チームのなかで、雲解像4次元変分法データ同化システムNHM-4DVARの開発を担当した。気象庁非静力学モデルの力学コア随伴モデルを用いて水蒸気移流や温かい雨の雲物理過程を導入するとともに、ドップラーレーダーやGPS気象観測など降水過程と関連性が高く時間空間分解能も高い新開発の観測データを同化できるようにして、世界最初の雲解像4次元変分法データ同化システムを完成させた。この複雑で巨大な先進的データ同化システムは、数値天気予報の新たな基盤となるものであり、また、局地豪雨などメソスケール顕著現象の時空間構造を描出する新手段でもあるので、申請者のシステム開発能力を高く評価することができる。

この新開発のデータ同化システムを3つの局地豪雨事例に応用して、メソ対流系の予測可能性研究を行った。そもそも初期値問題として局地豪雨の予測が可能かどうか自明ではなかったが、NHM-4DVAR第一バージョンを用いた1999年練馬豪雨の事例研究でそれが可能であることを初めて実証した。このような時間空間規模での数値予報結果が観測データと比較しうる精度で再現された例はなく、当時、世界初の成果であった。2005年杉並豪雨の事例では、ドップラーレーダー反射強度のデータ同化は、観測と類似した線状降水帯の再現には有効であるが、長時間持続するメソ対流系の予報スキルを有意に改善しないことが示された。この点を克服するために、2009年那覇豪雨の事例研究では、GPS視線遅延量を新たに同化して、より広範囲の環境場の推定を向上させることでメソ対流系の予測可能性が高まることを実証した。システム開発と並行したこれら一連の予測可能性に関する研究結果は、応用気象学の分野で局地豪雨の数値予報に関する新知見をもたらした具体的成果であり、高く評価できる。

さらに、これらの事例解析で初めて解明されたメソ対流系の微細構造と時間発展は、局地豪雨をもたらすような大気擾乱の力学的メカニズム研究の端緒を開くものであり、これからのメソ気象学の学術的発展にも貢献するものである。

この研究は、申請者の数値モデル・データ同化システムの開発能力と応用気象学の数値実験研究に関する力量の高さを立証するものである。また、応用気象学やメソ気象学の学術的発展にも寄与するものであり、高く評価できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年2月13日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。