

# 審査の結果の要旨

氏名 幾田 泰醇

本論文は7章からなる。第1章は、イントロダクションであり、数値天気予報の歴史、雲微物理過程・惑星境界層の数値モデルにおける表現、リモートセンシングデータを用いた数値天気予報の検証に関する先行研究の概要が網羅されている。社会基盤を破壊する災害の原因となりうる集中豪雨や台風に伴う多量の降水の予測の高精度化を進めるためには、特に降水システムの内部鉛直構造、これに関わる水、熱、運動量の鉛直輸送の解明が重要である。しかし、その直接観測は困難であり、モデルを用いても不確実性が高い問題として知られる。本研究ではこの問題の解決のために、リモートセンシング観測に基づく雲微物理スキームの改良を行い、再現性を高めた数値モデルを用いて鉛直輸送メカニズムを解析すること、そして、降水系の鉛直構造変化をもたらす主要な物理過程を明らかにし、これらの物理過程が大気を与える影響を明らかにすることを目的としている。

第2章は、用いた研究手法として、数値天気予報モデルの詳細、及び、本研究で導入した衛星観測データを用いてモデル評価を行うための統合衛星シミュレータについて述べられている。

本論文の3つの主要部からなるが、第3章はその第1主要部である。衛星搭載型2周波降水レーダーおよびマイクロ波イメージャーを参照値として用いて数値モデルの検証を行い、それをもとに物理スキームの高度化を行っている。観測と精緻な比較によりモデルを検証するために開発した観測シミュレータを用いて豪雨事例を解析した結果、降水過程には雲水から雪への変換効率と雨滴蒸発効率が重要であることが見出され、これらを適切に扱うことによる雨滴粒径分布の修正によって雲微物理スキームが大きく改善できることを明らかにした。

第4章は、第2主要部である。ここでは検証のため偏波レーダーおよび降水粒子の数・大きさ・落下速度を計測可能なディストロメーターの観測データを用いている。台風Faxaiの内部構造の解析を行い、関連するモデルの雲微物理スキームの改良について述べられている。観測によると雨滴粒径分布はbimodalな構造を持つことに着目し、これを再現可能な1-momentスキームの開発を行っている。更に、偏波レーダー観測データより降水粒子形状の鉛直分布を求め、これに基づき、雪粒子形状の気温依存性をスキームに導入している。これらの雲物理スキームの変更により、レーダーで観測される偏波パラメータ予測の再現性の向上が図られただけでなく、高度1 km以下で過大であった水平偏波と垂直偏波の反射因子差 $Z_{DR}$ の抑制や、5 km以上で過小であった $Z_{DR}$ と偏波間位相差変化率の増加など、モデル全体の性能向上がもたらされた。これは、降水粒子の形状が水物質の鉛直分布そのものだけでなく、気温や水蒸気の鉛直分布にも影響を与えていることを示唆する。本結果の普遍性については事例を重ねる必要があるが、少なくとも1つ

の降雪事例では同様な結果を得た。

第5章は、第3主要部であり、地上レーダー観測を参照しながら、各種境界層スキームを評価した結果について述べられている。境界層スキームにはレイノルズ平均のナビエ・ストークス方程式に基づくものと、乱流の一部を陽に解像する Large Eddy Simulation(LES)スキームがある。モデルの格子間隔 250m は両スキームの有効性のはざまにあり、モデルの gray zone と呼ばれている。本研究ではこの gray zone 格子に着目し、台風に伴う境界層における特徴的な構造であるロール状対流の、両スキームによる再現性およびこのロール状対流が境界層高度に与える影響を調べた。ロール状対流は前者のスキームにおいては直接解像できないものの境界層高度への影響はある程度適切に表現されていること、LES ではロール状対流も境界層高度も概ね再現できるが、渦の水平スケールに問題があるなどの、スキームの性能に関する基礎的な情報を得た。また、関連して台風内部構造を特徴づける上昇流についても、境界層における台風中心への強い流れが再現できる LES のほうがより適切に表現できることも明らかにできた。

第6章では、スキーム評価に効率的な観測、スキーム改良の一般性、雪の形状の背景大気に対する効果、モデル分解能依存性など、論文全体を通してのいくつかの議論がなされている。

第7章では、結論が述べられている。本研究で行った観測シミュレータを導入したりリモートセンシングデータによる検証を経た、各種雲微物理スキームの改良、gray zone 格子における乱流スキームの境界層再現性・台風構造に与える影響などの主要な結果に加え、研究で得られた理学的な視点からの新たな知見がまとめられており、本研究の将来展望で結ばれている。

このように、本研究は、観測シミュレータの導入を通じてリモートセンシング情報との厳密な比較を行うことにより、数値モデルに組み込まれるマイクロプロセスである雲物理や境界層の表現の改良または基本特性の取得を通して、降水システムにおける重要な物理プロセスを明らかにするとともに、予測性能向上にも成功しており、純粋科学および応用科学の両側面において大気科学の進歩への貢献が大きい研究と認められる。

なお、本論文第3章は、佐藤正樹・沢田雅洋・草開浩・久保田拓志との、第4章は佐藤正樹・Woosub Roh・松岸修平・久芳奈遠美・清水達也・梅原章仁・永戸久喜との、第5章は佐藤正樹・沢田雅洋との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。