

# 論文の内容の要旨

論文題目 Improvements of the vertical structure of precipitation systems in the numerical weather prediction models by advancement of physical processes schemes using remote sensing observations as reference

(リモートセンシング観測データを参照値として用いた物理過程スキームの高度化による数値予報モデルでの降水システムの鉛直構造の改良)

氏 名 幾田 泰醇

## 1. はじめに

集中豪雨や台風に伴う多量の降水は、社会基盤を破壊する災害を引き起こす原因となる。そのため、降水を精確に予測することは防災上重要な課題であり、降水システムの内部構造を理解しモデリングすることが必要である。モデリングにおいては、精緻化された雲物理スキームは、数値天気予報の高精度化に加え、集中豪雨や台風などの機構解明に大きな役割を果たす。近年、観測技術の向上に伴い、レーダーや衛星といった広域かつ継続的なリモートセンシング観測を数値モデルの物理スキームの改良に利用する研究が行われるようになってきた。特に雲微物理スキームの改良は、降水系の鉛直構造の予測精度の向上に必要である。降水系内の鉛直構造は、大気の水、熱、運動量の鉛直輸送に関係している。この鉛直輸送量は、短い時間スケールでは豪雨や強風のような顕著な現象の強さを、長い時間スケールでは気候変動の大きさを決定するため、気象学的にも気候学的にも重要な量である。しかし、鉛直輸送自体を直接観測することは難しく、モデルや観測から推定される鉛直輸送量は不確実性が高い。本研究では、リモートセンシング観測に基づき再現性を高めた NWP モデルを用いて鉛直輸送のメカニズムを分析する。そして、降水系の鉛直構造予測の再現性向上に寄与する主要な物理過程を明らかにし、これらの物理過程が大気に与える影響を明らかにする。

## 2. 雲微物理スキームの改良

### 2.1. 衛星搭載型レーダーとマイクロ波イメージャ

衛星搭載型二周波降水レーダーとマイクロ波イメージャを参照値として数値モデルを検証し、それを基に物理スキームの高度化を行った。数値モデルは、気象庁非静力学モデル asuca を使用した。モデルとリモートセンシング観測の比較には観測を精緻にシミュレートする必要があるため、観測シミュレータを開発し検証に使用した。豪雨事例において、数値モデルからシミュレートした輝度温度と反射強度を検証した。従来の単周波レーダーの反射強度を用いた検証では、単位体積に含まれる粒子の種類を推定することは困難であった。しかし、本研究で実施した二周波レーダーの反射強度を用いた検証では、鉛直高度毎にどのような水物質が支配的であるかを判別するための情報が得られることを示した。検証の結果、従来の雲微物理スキームは、雲氷から

雪への変換が過少であり雨滴蒸発が過大であることが判明した。そこで、雪への変換効率と雲氷の落下速度に加えて雨滴粒径分布を修正した。その結果、対流圏上層で雲氷が増加し、対流圏下層では過剰だった蒸発抑制され雨が増加した。この水物質の鉛直分布の変化によって、輝度温度や反射強度のシミュレーション値は観測に近づいた(図1,2)。この改良が大気の鉛直プロファイルに与えた影響に注目すると、対流圏上において雲氷の増加は放射加熱による昇温をもたらした、対流圏下層において蒸発減少が潜熱加熱による昇温をもたらしたことが分かった。

## 2.2. 偏波レーダとディストロメータ

地上設置型偏波レーダとディストロメータを用いて台風の内部構造の検証を行った。偏波パラメータと降水粒子の粒径分布観測結果を基に、bimodal な雨滴粒径分布を再現可能な 1-moment スキームを開発した(図3)。さらに偏波パラメータ観測の鉛直分布を基にして、数値モデルの雪粒子に気温に依存した形状特性を導入した。これらの雲微物理スキームの変更によって、偏波パラメータ予測の再現性が向上し、高度 1km 以下で過剰であった水平偏波と垂直偏波の反射因子差 ( $Z_{DR}$ ) が抑制され、高度 5km 以上で過少であった  $Z_{DR}$  と偏波間位相差変化率 ( $K_{DP}$ ) が増加した(図4)。粒子の形状を現実に近い非球形とすることで、対流圏上層で雪の混合比と潜熱加熱が増加することが分かった。つまり、降水粒子の形状は、水物質の鉛直分布に加え、大気気温や水蒸気の鉛直プロファイルにも影響を与えることが示された。

また、スキーム改良の普遍性を確かめるため降雪事例でも同様の検証を行った。その結果、台風事例と同様に改良後の偏波パラメータの予測は観測に近づき改善した。台風と降雪事例で同様の結果が得られたことから、本研究の改善が事例に依らない普遍的なものである可能性が示唆された。しかし、雲降水システムの多様性を考慮すると、改良の普遍性を保証するためにはより広範で詳細な検証が必要となる。

## 3. 地上設置型レーダーを用いた境界層スキームの検証

台風 2 次循環における降水システム内部の境界層詳細構造予測と境界層スキームとの関係を調査した。境界層スキームは、レイノルズ平均ナビエストークス方程式に基づくスキームとして MYNN 3 (MYN)、gray zone スキームとして非等方 Deardorff モデル (ADM)、Large eddy simulation のスキームとして Deardorff (DDF)を用いた。格子間隔は 250m に設定した。予測値からドップラー速度をシミュレートし観測と比較し、gray zone における台風境界層の詳細構造であるロール状対流の再現性と、ロール状対流が境界層高度に与える影響を調査した。境界層高度は、MYN と ADM が観測よりも僅かに高かった。MYN と ADM の鉛直輸送には、サブ格子スケールの現象としてロール状対流の効果が組み込まれている。そのため、MYN と ADM は鉛直輸送をある程度予測できたがロール状対流自体は再現できなかった。一方で、DDF は格子スケールの現象としてロール状対流を陽に予測する。DDF のロール状対流や境界層の高度は、他のスキームよりも観測に近かった。しかし格子間隔 250m の DDF のロール状対流の水平スケールは、格子間隔 50m の DDF や観測よりも大きいという問題点があることが分かった。台風内

部の鉛直構造に注目すると、DDF の台風境界層内部のインフローの風速は、他のスキームよりも大きかった。そして、収支解析によると、このインフローの強化が、移流項を通じて、目壁周辺の上昇気流の強化に寄与していることがわかった。さらに、境界層内部のドップラー速度の空間スケールに注目し、DDF は、MYN や ADM よりも現実的であるものの、詳細構造の再現は不十分であることを定量的に示した（図5）。

#### 4. まとめと今後の展望

輝度温度、反射強度、偏波パラメータを参照値として、雲微物理スキームを検証した。その検証結果を基に、雲微物理スキームの改良を行った。改良した雲微物理スキームは、水物質の鉛直分布予測の飛躍的な向上をもたらした。この水物質の鉛直分布の改善は、気温・水蒸気の鉛直プロファイルや降水予測も改善した。改善に寄与した素過程は、雲氷から雪への変換効率、雨滴粒径分布であった。対流圏上層の雲氷の増加は、放射加熱により上層を昇温させ、対流圏下層の雨滴の鉛直分布の変化は、潜熱加熱による下層昇温をもたらしたことを示した。この改良によって気温・水蒸気の鉛直プロファイルや降水予測が改善した。また、降水粒子の形状を現実的な非球形に変更すると、対流圏上層で雪が増加し潜熱加熱が増加することを示した。つまり、降水粒子の形状は、大気の水物質・気温・水蒸気の鉛直プロファイルに影響を与えていることを実証した。次に、ドップラー速度を用いて台風境界層を検証し、グレーゾーンにおける台風境界層予測の境界層スキーム依存性を明らかにした。MYN、ADM と DDF を比較し、DDF は、最も現実に近い境界層高度とロール状対流を予測できることを示した。台風内部の鉛直構造に注目すると、DDF の台風境界層内部のインフロー風速と目壁周辺の上昇流は、他のスキームよりも強いことが分かった。収支解析の結果、この上昇気流の強化は、境界層内部のインフローの強化が寄与していたことを明らかにした。このように境界層高度の再現性をドップラー速度のシミュレーションを通じて実証した研究は例を見ないものである。本研究において、水物質の空間分布や粒子形状に加え境界層詳細構造の再現性向上から得られた大気との相互作用に関する知見は、物理スキーム高度化や雲降水過程の不確実性を低減し、その進展と理解に大きく寄与することが期待される。また、観測シミュレーションの精度向上をもたらす本研究の成果は、予測の初期値問題の改善をもたらす同化技術の高度化に必要不可欠なものとなる。

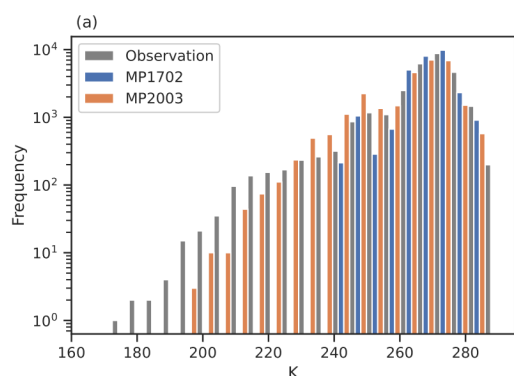


図1 GPM マイクロ波放射計 89GHz の輝度温度のヒストグラム。観測（灰色）、モデル修正前（青色）、モデル修正後（橙色）。

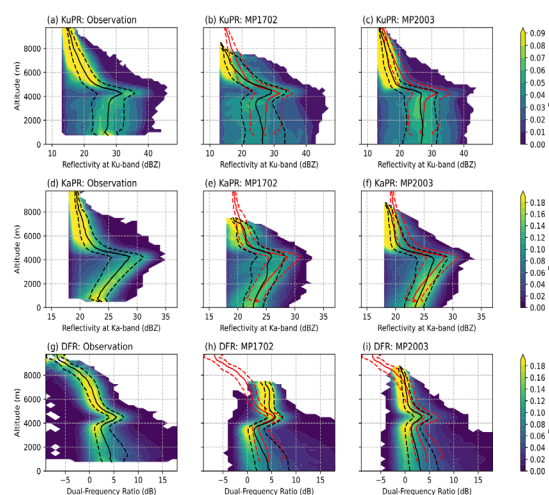


図2 GPM 搭載 2 周波降水レーダの高度別頻度分布。(上段) Ku 帯反射因子、(中段) Ka 帯反射因子、(下段) Ku と Ka の差。(左列) 観測、(中列)、モデル修正前 (右列)、モデル修正後。破線、実線、破線はそれぞれ 25th, 50th, 75th パーセンタイル。中列と右列の赤線は観測のパーセンタイルを表す。

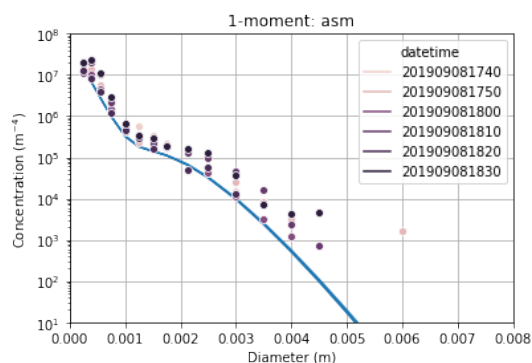


図3 雨滴の粒径分布。光学式ディストロメータで観測された粒径分布（丸印）とモデルで計算された bimodal 粒径分布（青線）。

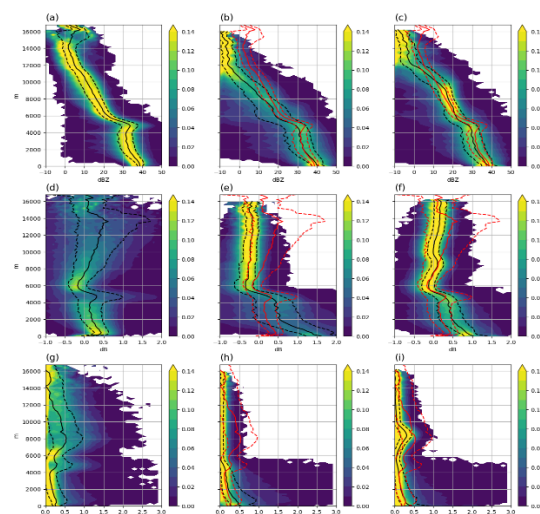


図4 二重偏波レーダーの高度別頻度分布。(上段) 水平偏波反射因子、(中段)  $Z_{DR}$ 、(下段)  $K_{DP}$ 。それ以外は図2と同じ。

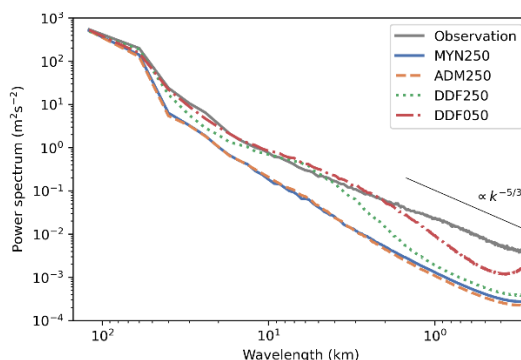


図5 ドップラー速度のパワースペクトル。観測（灰色）、MYNN3 水平格子間隔 250m（青色）、ADM 水平格子間隔 250m（橙色）、DDF 水平格子間隔 250m（緑色）、DDF 水平格子間隔 50m（赤色）。