

学位論文題名

Study on the Relationship between Raindrop Size
Distribution and Precipitation Cloud

(雨滴粒径分布と降水雲との関係に関する研究)

学位論文内容の要旨

雨滴は、降水雲中で凝結や衝突併合・衝突分裂など様々な微物理過程を経て形成された最終生成物であるので、雨滴粒径分布(雨滴粒径の度数分布)は降水形成のメカニズムを理解するための重要な情報をもっている。また、気象レーダーによる降水量推定はレーダー反射強度(雨滴直径の6次モーメント)と降水強度(3次モーメント)との関係式を用いて行われているので、雨滴粒径分布は実用的にも重要である。また、雨滴粒径分布に関する知識は気象モデルにおける微物理パラメタリゼーションの改良にも有効である。

雨滴粒径分布の形状は時々刻々変化し、その変化形態は複雑である。そこで、雨滴粒径分布の観測データを取得し、分布型の一般的な変化形態を調べた。また、雨滴粒径分布の形状や変化形態はその降水雲の降水形成過程を反映していると考えられるので、降水雲の性質と雨滴粒径分布との関係を調べることは興味深い。そこで、対流雲と層状雲の雨滴粒径分布を比較し、分布型の違いの原因を探った。さらに、激しい時間変化をする対流雲については、その一生を発達期、最盛期、衰退期の各ステージに分け、各ステージ毎の雨滴粒径分布特性を比較し、微物理過程との関係を調べた。

3カ年にわたる地上観測によって取得した雨滴粒径分布データに主成分分析を適用し、雨滴粒径分布の変化形態を客観的に捉えることを試みた。その結果、雨滴粒径分布の変化は2通りの形態に集約できた。つまり、最も主要な変化形態は全ての粒径の雨滴数が一様に増加(減少)するもので、降水強度の増加(減少)に強く依存していた。その次に主要な変化形態は小雨滴が減少(増加)し、大雨滴が増加(減少)するものであった。従来は、後者に相当するような変化形態が降水強度の増加(減少)に伴って起きるという認識があったが、この結果はそのような認識に対して再考の必要性を示している。

降水雲を気象レーダーで観測すると、降水粒子の融解に伴う誘電率の変化及び降水粒子の併合の増加のため、一般に層状雲では0℃高度の直下で反射強度の極大が現れるが、対流雲では現れない。このような特徴を利用して、対流雲と層状雲を分類し、それぞれの雨滴粒径分布を同程度の降水量(単位体積当たりの水質量)で比較すると、層状雲の降水には対流雲の降水より、大きな雨滴が相対的に多く含まれて

いるという結果が得られた。このような分布型の違いは、いくつかの過去の研究で指摘されているが、その原因はきちんと調べられていない。

一般的に、層状雲と対流雲の0℃高度の直下での反射強度の極大の有無は、層状雲では落下速度の遅い雪片が融解しながらゆっくりと高度を下げるのに対して、対流雲では落下速度の速い霰粒子が融解しながら速やかに高度を下げるためと上昇流によって持ち上げられるものが混在するためと考えられている。つまり対流雲と層状雲は、0℃高度より高い高度に存在する氷粒子の種類が異なるとされている。このことに基づくと、対流雲内の上昇流中で形成された霰粒子と層状雲内で雪粒子の併合によって形成される雪片という、0℃高度よりも高い高度で生成される氷粒子の違いが、雨滴粒径分布の差異の主な原因であると想像される。これを確かめるために、過去の研究結果を引用して解析した。霰粒子と雪片が融解した後に形成される雨滴粒径分布を同程度の雨水量で比較すると、対流雲と層状雲との比較で得られたのと同様の傾向がみられた。つまり、0℃高度よりも高い高度にある氷粒子が、霰粒子(対流雲)か雪片(層状雲)かの違いによって、異なる雨滴粒径分布が生じることを示した。さらに、雲内の降水粒子の種類を判別できるビデオゾンデとの同時観測を2例の対流雲に対して行った結果、対流雲の0℃高度よりも高い高度には、霰粒子が卓越していて、その時の雨滴粒径分布は対流雲に典型的な分布型であることが確認され、上記の結論が支持された。

一般に層状雲は時間変化が小さく、降水形成過程もほぼ定常状態ととらえることができるのに対し、対流雲は時間変化が激しく、雨滴粒径分布も、雨滴成長過程の時空間的な履歴の影響を受け、変化する可能性がある。しかしこのようなことに関する研究例はない。そこで、レーダー反射強度データに基づいて、対流雲を成長ステージ毎に分類して、最盛期と衰退期の雨滴粒径分布の特性を調べたところ、最盛期では、対流活動が強いほど全ての粒径で数濃度が増加していた。一方、衰退期では過去の対流活動が強いほど大きな粒径の数濃度の割合が増加する傾向があり対流雲の成長ステージ毎に雨滴粒径分布が異なる特性をもつことが分かった。このような観測結果を生じさせる微物理過程を調べるために、数値雲モデルを構築した。この雲モデルは、核化・凝結・衝突併合・衝突分裂・自然分裂などの諸過程が複雑に関わる雨滴成長過程を詳しく捉えるために、力学過程を単純化しており、いわば、鉛直1次元時間依存型のシャフトモデルに鉛直シアをもった水平風を組み入れたものと言え、新しいタイプの雲モデルである。この雲モデルを用いてシミュレーションを行った結果、観測事実をよく再現できた。次に、対流雲の最盛期と衰退期にどのような微物理プロセスが卓越しているかを調べた。その結果、最盛期では、雨滴同士の衝突併合による大雨滴と衝突分裂による小雨滴の形成が卓越しており、且つバランスしていて、粒径分布がほぼ平衡状態となっていた。一方衰退期では、衝突併合・衝突分裂よりも落下による大雨滴の数の減少が卓越していた。このことから、最盛期と衰退期の粒径分布の特性の違いが、平衡状態を保っているかどうかという概念で説明できることを示した。

雨滴粒径分布に関する従来の研究は、レーダーを用いた降雨量推定への応用目的であることが多く、雨滴形成過程について詳しく調べたものは少ない。また、雨滴形成過程と雨滴粒径分布との関係について論じていても、非常にシンプルな条件を

想定している研究がほとんどである。本研究により、雨滴粒径分布の変動形態の一般的特徴が明らかになり、また、より実際的な条件下で、雨滴粒径分布の形状や変動形態と雨滴形成過程との関係を明らかにすることができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 播磨屋 敏 生
副 査 教 授 林 祥 介
副 査 教 授 渡 部 重 十
副 査 教 授 藤 吉 康 志

(大学院地球環境科学研究科(低温科学研究所))

学位論文題名

Study on the Relationship between Raindrop Size Distribution and Precipitation Cloud

(雨滴粒径分布と降水雲との関係に関する研究)

雨滴は、上空の降水雲中での力学過程と微物理過程との総合結果として生成され、地上に落下してきたものである。それで、雨滴粒径分布は両過程の情報を含んでいるので、雨滴粒径分布は、降水機構を解明するための元データとなりうる。現在の雨滴粒径分布研究のもとになった Marshall and Palmer (1948)の観測結果はあまりにも有名で、これで粒径分布問題はかたずいたと思っている人が少なからずいるようである。

しかし、その後の研究によっても、雨滴粒径分布の一般的特徴は固まっていない。実用上、気象レーダーから降水量を推定する必要に迫られ、行なわれた粒径分布のたくさんの観測結果によれば、場所により、時間によって変わることが知られてきた。それで、現在ではレーダー気象学研究及び気象現業上雨滴粒径分布は有用な情報であるにもかかわらず、その分野では陽に扱っていない。

本論文は、現地観測に基づいた雨滴粒径分布の一般的特徴及び降水雲との関係、また数値シミュレーションによって観測結果を含む雨滴形成過程を明らかにしたものであり、第1章序論から第8章結論で構成されている。

第1章は序論であり、この問題に関する現在までの研究経過と、それに基づく研究の方向及び展望を述べている。

第2章では、梅雨期に3年間にわたって行なわれた九州西部～南西部での特別観測の状況、観測機器及び得られたデータについて記述している。

第3章では、得られた雨滴粒径分布観測値に主成分分析法を適用して得られた一般的特徴を示している。変動への寄与率が一番大きい第1主成分は、降水量の増加につれて、小さい雨滴も大きい雨滴も一様に増加する平行運動を示した。この特徴は、降水量の増加につれて、粒径分布の傾きがゆるくなるとし

た Marshall and Palmer 分布とは異なる一般的特徴で, Marshall and Palmer 分布に対して再検討を求めた形となった. 次に寄与率の大きい第 2 主成分は, 降水量に関係のない成分で, 回転運動を示した. この特徴は, 雨滴間の相互衝突または雨滴のもとになる上空の固体降水粒子の種類によることが示唆され, 後の研究に続いた.

第 4 章では, 前章で示唆された固体降水粒子の種類と関係する降水雲タイプと雨滴粒径分布との関係を述べている. 対流雲と層状雲の雨滴粒径分布を雨量と粒径分布の傾きで分類した結果, 層状雲の方が傾きがゆるかった. それに対して, 過去に得られている霰と雪片の融解直径から融解層直下の粒径分布の傾きを求めたら, 雪片の方が傾きがゆるかった. これらの結果について, 層状雲では雪片が生成されやすく, 対流雲では霰が生成されやすい特性を仲立ちにすると, 観測事実は対流雲と層状雲の相異に起因することがわかる. この解釈は, 現地で行なわれたビデオゾンデ観測でも実証された.

第 5 章では, 第 3 章で述べられた雨滴粒径分布の変動における回転運動のもとになる, 対流雲の発達段階に依存する雨滴粒径分布の特性を述べている. 最盛期では対流活動度が強いほど小さい雨滴も大きい雨滴も一様に増加するが, 衰退期では過去の対流活動度が強いほど大きい雨滴のみしか増えない回転運動を示した. すなわち対流雲の発達段階によって, 雨滴粒径分布の変化が違ふということも示した.

第 6 章は, 微物理雲モデルの記述であり, 第 7 章はその数値シミュレーションの結果を示している. 微物理雲モデルは, 鉛直 1 次元時間依存型のシャフトモデルに鉛直シアをもった水平風を組み入れた新しいタイプの雲モデルである. この雲モデルを使ったシミュレーションの結果, 最盛期では対流活動度が強くなるにつれて雨滴粒径分布の変化が平行運動を示し, 衰退期では過去の対流活動度が強くなるにつれて変化傾向が回転運動を示した. すなわちシミュレーション結果が観測結果を再現できた. 次にこの膨大なシミュレーション値を解析して, なぜこのような変化傾向を示すかを明らかにした. それは, 最盛期と衰退期の粒径分布の変化が異なるのは, 雨滴粒径分布が形成過程において平衡状態になれるかどうかによっている事を雨滴集団をラグランジュ的に追跡することによって初めて示した.

このように, 申請者は今日まで明らかにされていなかった雨滴粒径分布と降水雲との関係を現地観測及び数値シミュレーションで明らかにし, 特に過去の一般的特徴に関する研究に統一的解釈をなした点と解析においてシミュレーション結果をラグランジュ的に追跡するという新しい視点を導入した点は高く評価され, 気象学の分野に多くの知見をもたらした.

よって, 審査員一同は, 申請者が北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格あるものと認める.