

京都大学	博士（工学）	氏名	岡崎 恵
論文題目	二峰性雨滴粒径分布に対する雲力学・雲微物理学的メカニズムの究明		
（論文内容の要旨） 本論文は、雨滴粒径分布が二峰性を示す降水事例に対して、降水強度推定手法の開発、及び、二峰性をもたらす雲力学・雲微物理的メカニズムの解明を論じたものであり、全 6 章からなる。 第 1 章は序論であり、二峰性の雨滴粒径分布が研究対象となるまでの経緯について述べられている。豪雨の推定・予測に対しては、雨滴サイズごと粒子数、すなわち雨滴粒径分布情報が必要である。リアルタイムの降水量推定に用いられる気象レーダーや数日・数時間先の降水量予測に用いられる気象モデルにおいて、雨滴粒径分布は基礎的なパラメータとして位置付けられる。その一方で、気象レーダーはリモートセンシング技術であるために雨滴粒径分布を直接観測できない。気象モデルは計算コストの問題から雨滴粒径分布を陽に計算しない。そこで、気象レーダー・気象モデルでは、関数で近似された雨滴粒径分布情報を扱う。しかし、実際の降雨事例において、従来型の近似関数では表現することが難しい形状の雨滴粒径分布が観測されることがある。つまり、このような降雨事例では気象レーダーによる推定・気象モデルによる予測に誤差が生じ、推定精度に影響することが懸念される。代表的な特異形状の一つが、二峰性である。二峰性分布の存在が雨量にどれくらい影響するのかはこれまでに明らかにされていない。また、雨滴粒径分布が二峰性となる降水メカニズムは定量的かつ包括的に明らかにされていない。既往研究で最も支持されているのが、雨滴同士の衝突併合・分裂の平衡時に二峰性が形成されるという説である。これに対して、雨滴ごとの落下速度の違いに起因するサイズソーティングについても取り上げられてきた。このように、二峰性形成に寄与するメソスケールの降水システムの影響を受ける過程とマイクロスケールの雨滴成長の過程を定量的かつ包括的に明らかにした先行研究は存在しない。本研究は、二峰性分布の存在を考慮した降水強度推定を実施し、精度評価を通じた二峰性分布の雨量に対する感度を調べた。さらに、スコールラインの理想実験を実施し、雨滴粒径分布が二峰性となるまでに作用する雲力学過程及び雲微物理過程を定量的に調べ、メカニズムの包括的な理解を試みた。 第 2 章では、気象レーダーで観測可能なパラメータに基づく降水強度推定の新手法を開発した結果について述べられている。ここでは、二峰性を近似できる関数を使用し、そのフィッティングパラメータから降水強度推定式を導出した。フィッティングパラメータは、地上に設置された雨滴計で観測された雨滴粒径分布に対して関数近似することで求められた。そのパラメータから散乱計算することでレーダーパラメータを変換し、雨量との対応関係を定式化した。この推定式と従来型の関数を使用した推定式及び国土交通省の気象レーダーシステムが採用する推定式をそれぞれ用いた推定の結果を比較した。その結果より、二峰性の存在を考慮する新手法に基づく推定は、特に 15 mm h⁻¹ 以上の強雨時に精度が良いことがわかった。これは、二峰性が雨量に対して感度があることを示す。しかし、従来型の関数を用いた推定が優れている時間も存在した。この結果から、フィッティング法や関数定義の見直しが今後必要であることについて考察された。また、二峰性分布はどのような降水形態のときに、どのような過程を経て形成するのかについて明らかにすることの重要性が示された。			

京都大学	博士（工学）	氏名	岡崎 恵
第3章においては、気象モデルによるスコールラインの理想実験の結果について述べられている。現業の降水予測に利用されるような気象モデルにおいては、二峰性を表現することができない。そこで、本研究では降水粒子の粒径区分（ビン）ごとに計算するビン法を雲微物理パラメタリゼーションとして用いた。シミュレートされたスコールラインは2時間で発達期・成熟期・衰退期を迎えた。顕著な二峰性をある閾値に基づいて調べると、衰退期に最も形成されていたことがわかった。この衰退期における二峰性分布の形成メカニズムを調べた。二峰性分布は最大値・極小値・極大値を持っていた。そこで、これらの極値を構成する粒子の数密度変化を定量化した。最大値・極小値・極大値を構成する雨滴はそれぞれ異なる移流過程を辿っていた。これは雨滴サイズごとの数密度と落下速度の違いに起因していた。この雨滴サイズ間の移流の違いが、二峰性の形成に繋がっていたことが明らかになった。移流が寄与して形成される二峰性が衰退期に最も形成されるのは、発達期に存在する強い上昇流下では移流の違いが生まれにくいのに対して、衰退期の変動が激しい風速場において移流の違いが生まれやすかったことを示唆している。 第4章では、ビン法雲微物理パラメタリゼーションに対して雨滴同士の衝突分裂スキームを実装した。第3章で実施されたシミュレーションでは、衝突分裂が計算されていなかった。衝突分裂は、先行研究において二峰性分布のメカニズムとして重要視されていたことから、本章で実装に着手した。使用した気象モデルには既に衝突併合スキームが入っていたため、衝突併合に付随する形で、大きな粒子が衝突した場合に分裂が起きる条件分岐を導入した。分裂を計算したシミュレーションを、分裂を計算していないシミュレーションと比較すると、最大上昇流が弱まり、降水システムの継続時間が延びた。この結果は、既に分裂が実装されていたバルク法の結果に類似していた。さらに分裂を計算することで、小さい粒子の蒸発量が増え、地上の冷却が強まった。このことから、衝突分裂によって小さな破片粒子が生成され、この粒子の蒸発冷却によってコールドプールの強化が起きていたことが考えられた。 第5章では、衝突分裂スキームを導入した改良ビン法を用い、スコールラインの理想実験を再度実施した。二峰性の形成に寄与する雲微物理過程を解析し、その主因ごとに分類を行った。極値形成に衝突併合が最も寄与した二峰性はスコールラインの発達期に形成されやすかった。またそのグリッドでは上昇流と降水強度がともに大きかった。このような環境下において、雨滴の衝突機会が増加していたことが原因と考えられた。これに対して、移流が最も寄与した二峰性の形成グリッドでは、上昇流と降水強度がともに弱かった。第3章で示された、移流が影響する二峰性が、移流の違いが生まれやすい環境下で形成されたことに対応していた。さらに、極小値における併合による数密度減少量よりも、分裂による極大値における数密度増加量が多い二峰性も存在した。このような二峰性は、併合によって形成された後、強い対流域から逸脱することで分裂の寄与が増大していたことが明らかになった。 第6章は結論であり、本論文で得られた成果について総括している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、豪雨災害の軽減に直結する降水量推定・予測の精度向上を背景とし、雨滴粒径分布の二峰性に着目した研究である。二峰性分布が雨量推定に与える感度を評価するとともに、二峰性分布の形成メカニズムを解明したものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 二峰性分布を考慮した降水強度推定手法の開発：二峰性を近似可能な関数を用いた新たな降雨強度推定手法を開発し、従来手法と比べて推定精度が向上することを確認した。これにより高精度な雨量推定において二峰性分布の考慮が重要であることを示した。
2. ビン法による二峰性形成メカニズムの解明：ビン法雲微物理パラメタリゼーションを用いたスコールラインの理想実験により、粒径区分ごとの数密度変化を解析し、雨滴の落下速度差に起因する移流の差異が二峰性形成の主要因であることを定量的に明らかにした。加えて、衝突分裂スキームを新たに導入し、平衡状態における検証を行い、モデルに実装した。分裂に伴う微細粒子の蒸発冷却が最大上昇流の抑制や降水システムの持続に寄与することを示した。これは雲微物理過程の精緻な表現が降水セルの全体構造に影響することを示す重要な結果である。
3. 物理過程に基づく二峰性形成の要因解析：二峰性の形成要因を物理過程に基づいて分類し、衝突併合過程が主導するタイプは上昇流と降水強度がともに大きい環境下で発生し、移流過程が主導するタイプは上昇流と降水強度がともに小さい環境下で発生することを解明した。これにより、雲の力学特性と粒径分布特性の関係を明らかにし、二峰性形成プロセスの包括的理解に貢献した。

以上の通り、本論文は雲力学および雲微物理学の両面から二峰性分布の形成プロセスに関する先駆的かつ独創的な知見を提示し、加えて、降水強度推定における実用的重要性を明示しており、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、令和8年2月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 2026年 6月 22日以降