

京都大学	博士（工学）	氏名	松 田 景 吾
論文題目	乱流中に分散する液滴の放射特性および衝突成長特性に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、雲の中に見られる多数の液滴の可視光線、赤外線およびマイクロ波に対する放射特性および衝突成長特性に及ぼす乱流の影響に関する研究の結果をまとめたものであり、8章からなっている。 第1章は序論であり、本研究の背景について概観し、本研究の目的およびその重要性について述べている。 第2章では、液滴の分散を伴う定常等方性乱流場の三次元直接数値シミュレーション（Direct Numerical Simulation, DNS）を行うことにより、乱流中における液滴の基礎的な分散特性の評価を行っている。その結果、DNSにより得られた乱流中における液滴の空間分布にはクラスタが見られ、そのクラスタはストークス数が1程度の場合に最も顕著に現れる傾向があることを確認している。また、このような液滴の空間分布から数密度変動のパワースペクトルを算出することにより、そのパワースペクトルのピークをとる波数がクラスタのスケールとほぼ一致すること、およびコルモゴロフスケールで正規化したクラスタのスケールや微細構造はストークス数には強く依存するが、乱流レイノルズ数には依存しないことを明らかにしている。 第3章では、気候変動予測や気象予測において高精度な評価が重要となる雲の放射特性に及ぼす液滴の乱流クラスタリングの影響について検討を行っている。具体的には、第2章と同様に液滴の分散を伴う定常等方性乱流場の三次元 DNS を用いて乱流クラスタリングを伴う液滴の空間分布を求め、この液滴の空間分布に対して Monte Carlo 光子追跡法に基づく放射伝達シミュレーションを適用することにより、可視光線および赤外線に対する放射特性に及ぼす乱流クラスタリングの影響を評価している。その結果、可視光線の場合には放射特性に及ぼす乱流クラスタリングの影響は小さいが、赤外線の場合には乱流クラスタリングにより透過率が増加し、反射率および吸収率が減少することを明らかにしている。また、このような放射特性に及ぼす乱流クラスタリングの影響は、乱流レイノルズ数が大きくなるほど、またストークス数が1よりも小さくなるほど、小さくなることも明らかにしている。さらに、DNSおよび放射伝達シミュレーションの結果に基づいて光学的厚さに対する補正係数を評価することにより、実際の雲の中の放射伝達に及ぼす乱流クラスタリングの影響が無視できるほど小さいことを明らかにしている。 第4章では、降雨や雲のレーダ観測において重要となるマイクロ波に対する雲の反射特性に及ぼす液滴の乱流クラスタリングの影響について検討を行っている。具体的には、液滴の分散を伴う定常等方性乱流場の三次元 DNS により乱流クラスタリングを伴う液滴の空間分布を求め、この液滴の空間分布に対して、液滴からの散乱波の干渉の効果を考慮したマイクロ波の散乱強度計算を行うことにより、レーダ観測において重要な反射特性量であるレーダ反射因子に及ぼす乱流クラスタリングの影響を評価している。その結果、レーダ反射因子は液滴の乱流クラスタリングにより増加し、その増加量はマイクロ波の波数が大きくなるほど、またはストークス数が0に近づくほど小さくなるが、乱流レイノルズ数には依存しないことを明らかにしている。さらに、レーダ反射因子に及ぼす乱流クラスタリングの影響の大きさを示すクラスタリング係			

京都大学	博士（工学）	氏名	松 田 景 吾
数と呼ばれるパラメータを用いた簡易評価により，実際の雲のレーダ反射因子が乱流クラスタリングによって無視できないほど大幅に増加する可能性があることを示唆している． 第5章では，第4章で述べたレーダ反射因子に及ぼす乱流クラスタリングの影響について，実際の雲のレーダ観測を想定することにより詳細に検討している．具体的には，海洋上の観測データに基づく対流雲のメソスケール数値シミュレーションデータを解析することにより，レーダ観測におけるレーダ反射因子の評価を行っている．その際，乱流クラスタリングの影響を考慮してレーダ反射因子を評価するために，液滴の数密度変動のパワースペクトルに基づくレーダ反射因子の評価モデルを開発し，このモデルを対流雲のメソスケール数値シミュレーションデータの解析に適用している．実際のレーダの周波数や解像度を考慮して本解析を行った結果，2.8GHz～9.4GHzの低周波数のマイクロ波を用いる場合には，対流雲のレーダ反射因子は乱流クラスタリングにより大きく増加するために，この影響を考慮しない場合には，対流雲中の雲水量を過大評価する可能性があることを明らかにしている．また，このようなレーダ反射因子の増加が，対流雲の発生初期などのように，半径数十μmの液滴が多く，半径数百μmより大きな液滴が少ない場合に特に顕著であることを明らかにしている．一方で，35GHz および 94GHz の高周波数のマイクロ波を用いる場合には，乱流クラスタリングによる対流雲のレーダ反射因子の増加が小さく，レーダ観測に及ぼす乱流クラスタリングの影響が小さいことも明らかにしている． 第6章では，雲の放射特性の正確な評価において重要となる，乱流中における液滴の衝突成長特性の評価を行っている．具体的には，既往研究に比べて高い乱流レイノルズ数を含む様々な定常等方性乱流場に対して液滴間の衝突を考慮した三次元 DNS を行うことにより，液滴の衝突成長における重要な特性量である衝突頻度因子を算出し，既往研究の衝突頻度因子モデルとの比較を行っている．その結果，既存の衝突頻度因子モデルは，高レイノルズ数条件下における衝突頻度因子を十分に表現できず，その修正が必要とされることを明らかにしている． 第7章では，第6章で信頼性を検証した衝突頻度因子モデルの改良に有用な実験データを得るうえで不可欠な，液滴径分布の時間変化から衝突頻度因子を導出するための線形および非線形逆解析手法を提案している．これらの手法の信頼性を検証するために，乱流レイノルズ数の異なる定常等方性乱流場に対して液滴の衝突成長を伴う三次元 DNS を行い，得られた液滴径分布の時間変化のデータを用いて逆解析手法により導出された衝突頻度因子を，DNS により直接算出された衝突頻度因子と比較している．その結果，乱流レイノルズ数の増大に伴って逆解析手法による衝突頻度因子の導出誤差が増大する傾向が見られること，および広範囲のレイノルズ数の乱流場における液滴径分布の実測値から衝突頻度因子を導出する場合には，線形逆解析手法よりも非線形逆解析手法の方が有効であることを明らかにしている． 第8章は総括的な結論であり，本研究で得られた結果を要約するとともに，今後の進展が期待される研究課題についても言及している．			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、雲の中に見られる多数の液滴の放射特性および衝突成長特性に及ぼす乱流の影響に関する研究の結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 直接数値シミュレーションを用いて乱流クラスタリングを伴う液滴の空間分布を求め、この液滴の空間分布に対して放射伝達シミュレーションを適用することにより、可視光線および赤外線に対する放射特性に及ぼす乱流クラスタリングの影響について検討した。その結果、赤外線の場合には乱流クラスタリングにより透過率は増加し、反射率および吸収率は減少することが明らかになった。さらに、実際の雲の場合にはこの影響は無視できるほど小さいことが明らかになった。
2. 乱流クラスタリングを伴う液滴の空間分布に対してマイクロ波の散乱強度計算を行うことにより、マイクロ波に対する反射特性に及ぼす乱流クラスタリングの影響について検討した。また、この効果がレーダ観測に及ぼす影響について、対流雲のシミュレーションデータを用いて検討した。その結果、レーダ観測において重要な反射特性量であるレーダ反射因子は液滴の乱流クラスタリングの影響を受けて大きく増加することが明らかになった。また、乱流クラスタリングの影響を考慮しない場合には、局所的に対流雲中の雲水量を過大評価する可能性があることが明らかになった。
3. 液滴間の衝突を考慮した三次元直接数値シミュレーションを行うことにより、液滴の衝突成長特性に及ぼす乱流の影響について検討した。その結果、液滴の衝突成長における重要な特性量である衝突頻度因子に関する既存のモデルは、高レイノルズ数条件下における衝突頻度因子を十分に表現できず、その修正が必要とされることが明らかになった。また、この衝突頻度因子モデルの改良に有用な実験データを得るうえで不可欠な、液滴径分布の時間変化から衝突頻度因子を算出するための逆解析手法を提案した。

以上、本論文は、液滴の放射特性に及ぼす乱流の影響の解明、ならびに衝突成長特性の評価およびその評価法の開発を行ったものであり、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、平成24年1月25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。