

## 論文審査の結果の要旨

氏名 鈴木 健太郎

地球温暖化研究の大きな不確定性要因の1つは、人為起源のエアロゾル（大気浮遊粒子）の間接効果と言われている。人為起源エアロゾルは直接的に放射に影響する以外にも、大気中で雲核として働き、雲粒子数の増加や降雨効率の減少を通じて雲量・雲の光学的厚さ・降雨量などを変化させ、間接的に気候に影響する。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第3次報告書（2001）では、産業革命後に人為起源エアロゾルが引き起こした大気上端での放射強制力は $-5\sim 0\text{W/m}^2$ と推定している。産業革命後に二酸化炭素等の人為起源温室効果ガスが生じた放射強制力は $2.6\pm 0.5\text{W/m}^2$ とされ、いかに間接効果の不確定性が大きいかがわかる。この原因は、エアロゾルの動態の複雑さに加えて、エアロゾル-雲粒子-雲場の相互作用に関する雲物理的な理解が不十分で、現象のモデル化が著しく遅れていることによる。本研究はこのような状況を克服する目的で行われた。

本論文は5章からなる。過去の研究と問題点を総括した第1章に続き、第2章では大循環気候モデルを用いて間接効果を再現し、人工衛星から得られた雲場と比較する研究を行った。大循環モデルでは、エアロゾル-雲の相互作用に関わる降水生成時定数のパラメータ化を3通りの方式に変えて数値実験を行った。その結果、時定数が雲核数に依存しない方式では、エアロゾルが蓄積される高気圧域で雲量が減少し、雲水気柱総量がエアロゾル気柱数密度の増加に伴って減少する傾向が見られた。一方、エアロゾル数の増加と共に降水が遅れる方式では、高気圧域で雲の寿命が延び、雲水気柱総量がエアロゾル数に顕著には依存しなくなった。衛星観測の結果は後者に近いことから、全球平均ではエアロゾル数の増加と共に降水が遅れる「寿命効果」が効いていることが示唆された。更に、雲の光学的厚さや有効粒子半径の全球分布を観測と比較すると、後者の方式の中でも時定数がエアロゾル数密度に非線形的に依存するものが良好な結果を与えることがわかった。

第3章では、エアロゾル-雲相互作用を、より現実的な物理法則に根ざしたモデルで理解するために、ビン型雲物理モデルを組み込んだ非静力雲モデル（以下鈴木モデル）を開発した。ビン型モデルでは粒子半径を対数等間隔のビンに区切って離散化し、雲粒子の拡散成長、

凍結、蒸発、併合、衝突、重力落下、移流、乱流拡散等の過程を再現する。また、これとは別に、雲粒径分布を基底関数の重ねあわせとして表現する関数展開モデルも作成した。30ピンを用いた鈴木モデルの結果を、気象庁統一非静力学モデルにヘブライ大学ピン型モデルを組み込んだモデルと比較したところ良い一致が見られた。次に、対数正規分布を基底関数に取った関数展開モデルを非静力学モデルに組み込んだところ、ピン型モデルの約1/3の10個程度の基底関数でも妥当な雲場を再現することがわかった。

第4章では30ピンの鈴木モデルに10ピンのエアロゾルモデルを結合して、エアロゾル数密度によって雲場が変化する過程を計算し、人工衛星による観測結果と比較した。その結果、エアロゾル数密度の増加に伴い、人工衛星で観測されるような降雨開始時間の遅れと雲の光学的厚さの増加が再現された。また、雲の有効粒子半径と光学的厚さの相関は、霧雨を伴う(伴わない)雲では負(正)となり、衛星観測データの解析結果と良く一致した。次に、雲パラメータの雲核数密度依存性を調べたところ、モデルで得られた有効粒子半径と雲核数密度、雲光学的厚さと雲粒子数の回帰直線の傾きは、過去の航空機や人工衛星の観測と整合するものになった。一方、雲水気柱総量は雲核数密度にはほとんど依存しないことから、非静力学モデルでも「寿命効果」の重要性が確認された。

本研究はエアロゾルと雲の相互作用を大循環気候モデル、エアロゾルと雲物理のピンモデルを組み込んだ非静力学モデル、の2つで調べたもので、世界的にも例を見ない。本研究のユニークな点は、これらのモデル結果を人工衛星から観測される雲の光学的厚さ・有効粒子半径と比較し、観測される雲水総量のエアロゾル数依存性に物理的に解釈を与えたことにある。また、雲の寿命効果が全球平均としての雲の挙動に効いていること、降雨を伴う雲と伴わない雲とで雲の光学的厚さと有効粒子半径の間の相関が逆になることを明らかにしたことは、地球の温暖化に果たすエアロゾルの間接効果を正確に評価する上で極めて重要な知見であり、高く評価できる。

なお、本研究第2章は中島映至・沼口 敦(故人)・竹村俊彦・河本和明・日暮明子氏との共著論文として既に印刷済であるが、論文提出者が主体となって問題の設定、数値実験と解析を行なったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。従って、論文提出者に博士(理学)の学位を授与できると認める。