

硫酸エアロゾルによる

雲粒生成・生長過程の立坑を用いた実規模実験研究

学位論文内容の要旨

雲および霧の水滴(雲粒)は、大気中の水溶性微粒子(水溶性エアロゾル)を核として水蒸気が凝結・成長することにより、生成される。硫酸粒子や硫酸アンモニウム粒子などの硫酸エアロゾルは、人間活動により大気中に排出される代表的な水溶性エアロゾルであるが、近年、二酸化炭素などの温室効果気体の増加による地球温暖化に対して、硫酸エアロゾルの増加が地球を冷却し、地球温暖化を抑制しているのではないかとされている。すなわち硫酸エアロゾルが増加すると、生成される雲はより粒径は小さいが雲粒数の多いものに変化し(これを Twomey 効果と呼ぶ)、その結果、雲層の日射反射率がより増加し、地表に到達する日射量が減少して、地球を冷却させるのではないかとされている。これを、エアロゾルの間接効果と呼ぶ。

この間接効果については、これまで、雲の雲粒分布や、日射反射率、および雲の周囲のエアロゾルの粒径分布などについて、航空機観測や人工衛星を用いたりリモートセンシングが行われてきた。しかし、どのような組成のエアロゾルの増加により、実際に生成される雲粒の粒径分布がどのように変化するか、という雲粒生成・成長の初期段階における研究については、実験室での定常条件でのチャンバー実験によって行われたのみであった。一方実大気中では、さまざまな大きさの乱流による混合過程を伴った非定常・非平衡過程により雲粒が生成され、成長しているものと考えられる。そこで本研究では、実規模での雲粒の生成・成長過程を実験的に検証することを目的として、釜石鉱山の立坑を利用した実験研究を行った。

本論文の第一章では、研究の背景として、上述したエアロゾルの Twomey 効果および間接効果と、雲粒の生成・成長理論について概説した。

第2章では、本研究で用いた釜石鉱山の日峰中央立坑(縦 5.5 m、横 3 m、深さ 430m)について、その構造と、本実験用の改善点について述べた。立坑は、基本的には、閉鎖系であり、気温の局所変化も非常に小さい構造物であるため、流入する水蒸気量、エアロゾル量を正確に把握することができ、また気象条件を一定に保つことができる。ただし、実際には、少数の横穴が存在するため、本実験では、横穴を塞ぎ、底部の流入口も1方向からの清浄空気流入口のみに制限し、また、上部出口に上昇気流発生用のファンを設置した。これらの改善の結果、バックグラウンドエアロゾルの濃度を海洋大気中での濃度にまで低

下させることができた。

第3章では、本立坑実験施設を用いて、硫酸エアロゾルの濃度増加に伴う雲粒の生成とその粒径の変化について、実規模での実験を行い、その結果から雲粒生成に関する各パラメーターの寄与を推定した。実験では、立坑底部に導入直後のエアロゾルと、雲底から高さ100mまでの5点の各高度での、不活性エアロゾル(雲粒の核とならなかったエアロゾル)、および生成された雲粒の粒径分布を測定した。その結果、まずエアロゾル数の減少と、それに伴う雲粒の発生・成長を確認した。立坑下部から導入する硫酸エアロゾルの数濃度を3段階に変化させ、上昇流速も2段階に変化させて、これらが雲の生成・成長過程に与える影響を評価した。粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下の粒子は、かなりの高い過飽和度でなければ活性化しないが、今回の実規模実験では、雲粒の生成直後でも、粒径が $0.1\mu\text{m}$ 以下の小さい粒子が雲粒の核として活性化していた。これは、最大過飽和度が部分的に大きい箇所(領域)があったためと考えられる。一方、これまで通常活性化と言われていた粒径 $0.5\mu\text{m}$ 程度の大きな粒子において、不活性なものが存在していた。これらの結果、実規模の立坑内での気塊においては、空間的に過飽和度が大きい領域と小さい領域とが不均一に存在しており、その結果、活性化する粒径が幅の広いものになったと考えられる。

生成された雲粒については、硫酸エアロゾルの増加に伴って雲粒径は減少し、雲粒数濃度は増加しており、雲粒生成の初期段階から Twomey 効果が確認された。雲粒のモード径は $4\sim 5\mu\text{m}$ であった。また、雲粒数濃度の空間的ばらつきをもたらす乱流のスケールの大きさを測定した。雲粒数濃度の時系列変動はエアロゾル数濃度の変動とは異なり、より短い周期の変動が卓越していた。風速変動と気温変動とが同期しており、乱流の存在により、水蒸気分布と温度分布にばらつき(不均一性)が生じ、その結果、過飽和度の分布にばらつきをもたらして、上述した雲粒分布の広がりをもたらしているものと考えられる。

第4章では、硫酸エアロゾルの濃度変化が、生成された雲粒数濃度にもたらす効果について検討した。硫酸エアロゾル数濃度と雲粒数濃度に関して、実大気での観測結果と立坑での実験結果とを比較すると、どちらもエアロゾル数の増加に伴い、雲粒数が増加している。しかし、立坑での実験結果は、実大気観測結果に比べて、雲粒数は相対的に少ない傾向を示した。また、上昇流速の40%の増加に対して、雲粒数は10~25%増加しており、エアロゾル数が増加するほど雲粒数も増加することが確認された。

以上のように本研究は、立坑を用いた実規模での実験により、水溶性エアロゾルによる Twomey 効果を確認し、また、雲粒の生成・成長過程において大気乱流の存在が大きく影響していることを、初めて実験的に明らかにしたものである。

学位論文審査の要旨

主査 教授 太田 幸雄
副査 教授 田中 信壽
副査 教授 窪田 英樹
副査 助教授 村尾 直人

学位論文題名

硫酸エアロゾルによる

雲粒生成・生長過程の立坑を用いた実規模実験研究

雲および霧の水滴（雲粒）は、大気中の水溶性エアロゾルを核として、水蒸気が凝結・成長することにより生成される。硫酸粒子や硫酸アンモニウム粒子などの硫酸エアロゾルは、人間活動により大気中に排出される代表的な水溶性エアロゾルであるが、近年、二酸化炭素などの温室効果気体の増加による地球温暖化に対して、硫酸エアロゾルの増加が地球を冷却し、地球温暖化を抑制しているのではないかとされている。すなわち硫酸エアロゾルが増加すると、生成される雲は、より粒径は小さいが雲粒数の多いものに変化し（これを Twomey 効果と呼ぶ）、その結果、雲層の日射反射率がより増加し、地表に到達する日射量が減少して、地球を冷却させるのではないかとされている。これを、エアロゾルの間接効果と呼ぶ。

この間接効果については、これまで、雲の日射反射率および雲の周囲のエアロゾルの粒径分布について、航空機観測や人工衛星を用いたリモートセンシングが行われてきた。しかし、どのような組成のエアロゾルの増加により、実際に生成される雲粒の粒径分布がどのように変化するか、という雲粒生成・成長の初期段階についての研究に関しては、実験室での定常条件でのチャンバー実験によって行われたのみであった。一方実大気中では、さまざまな大きさの乱流による混合過程を伴った非定常・非平衡過程により雲粒が生成され、成長しているものと考えられる。また、エアロゾルを核として生成された雲（霧）は、消滅（蒸発）する際に多数のエアロゾルを生成・放出する。これらのエアロゾルはまた、相対湿度が 100%を超える過飽和状態に到ると、雲粒生成の核として作用する。

以上のような背景から、本研究ではまず、霧（雲）の消滅にともなうエアロゾルの生成・放出過程について実測を行った。すなわち、北太平洋海域での海霧観測により、ガス成分を吸収しつつ生成された霧が消散する際に、破碎により微小エアロゾルを多数放出し、エアロゾルの季節変動に影響を及ぼすことを、初めて明らかにした。

次に、本研究では、釜石鉱山の日峰中央立坑（縦 5.5 m、横 3 m、深さ 430m）において、硫酸エアロゾルによる雲粒生成・成長過程の実規模実験研究を行った。立坑は、基本的には閉鎖系であり、気温の局所変化も非常に小さい構造物であるため、流入する水蒸気量やエアロゾル量を正確に把握することができ、また気象条件を一定に保つことができる。ただし実際には少数の横穴が存在するため、本実験では、まず横穴を塞ぎ、底部の流入口も 1 方向からの清浄空気の流入口のみに制限した。また上部出口に上昇気流発生用のファンを設置した。これらの改善の結果、バックグラウンドエアロゾルの濃度を清浄海洋大気中の濃度にまで低下させることができた。

以上のように整備した立坑実験施設において、硫酸エアロゾルの濃度増加に伴う雲粒の生成とその粒径の変化について、実規模での実験を行い、その結果から雲粒生成におよぼす各パラメーターの寄与を求めた。実験では、立坑底部に導入直後のエアロゾルと、雲底から高さ 100m までの 5 点の各高度での、不活性エアロゾル（雲粒の核とならなかったエアロゾル）、および生成された雲粒の粒径分布を測定した。その結果、まずエアロゾル数の減少と、それに伴う雲粒の発生・成長を確認した。立坑下部から導入する硫酸エアロゾルの数濃度を 3 段階に変化させ、上昇流速も 2 段階に変化させて、これらが雲の生成・成長過程に与える影響を評価した。これまでの室内実験では、粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下の粒子はかなりの高い過飽和度でなければ活性化しなかったが、今回の実規模実験では粒径が $0.1\mu\text{m}$ 以下の小さい粒子が雲粒の核として活性化していた。これは、大気中(立坑内)に過飽和度が部分的に非常に大きい箇所（領域）があったためと考えられる。一方、これまで通常活性化すると言われていた粒径 $0.5\mu\text{m}$ 程度の大きな粒子において、不活性なものが存在していた。これらの結果、実規模の立坑内の大気中においては、空間的に過飽和度が大きい領域と小さい領域とが不均一に存在しており、その結果、活性化するエアロゾルの粒径が幅の広いものになったものと考えられる。すなわち、立坑空気中に存在する乱流運動による熱および水蒸気の上方および下方輸送の結果、過飽和度に水平方向の不均一性を生じ、このような結果をもたらしたものと考えられる。

生成された雲粒については、硫酸エアロゾル数の増加に伴って、雲粒の平均径は減少するが雲粒数は増加しており、雲粒生成の初期段階から Twomey 効果が確認された。また雲粒数濃度の空間変動をもたらす乱流のスケールを測定したところ、雲粒数濃度の時系列変動は、エアロゾル数濃度の変動とは異なり、より短周期の変動が卓越していた。

以上の立坑での実規模実験結果に基づき、人為起源の硫酸エアロゾルの濃度が増加した場合に、生成される層雲系の雲の雲粒数濃度の予測式を、初めて作成した。

これを要するに、著者は、立坑を用いて、硫酸エアロゾルによる雲粒の生成・成長過程について、初めて実規模での実験的研究を行ったものであり、その結果は、人為起源エアロゾルの増加が、生成される雲の日射反射率を増加させ、地球温暖化を抑制する効果の予測評価に、大きく寄与するものである。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。