

研究・活動成果報告書

「一滴ごとの雲滴中の硫酸塩定量分析による雲滴の生成と成長過程の解明」

静岡理科大学 教授 南齋勉

【研究概要】雨雲は雲粒核となるエアロゾルに水分子が凝結することで形成され、粒子状物質やガス成分の取り込みや、水蒸気による吸湿過程を経て成長する。一般的に、雨や霧などの湿性沈着物中の化学組成の分析を行う際、採取装置に回収したサンプルに対して行われるため、これらの成分は時間・空間的に平均化される。このため、従来の採取法では、雨水が持つ詳細情報は失われている。雲粒の核形成から、雲粒への大気汚染物質の沈着、雲粒中における液相反応の解明には、時間空間分解能に優れた採取分析手法が重要である。

現在まで、雨一滴の成分定性や、液滴径の計測に関する報告はあるが、採取と計測の難しさから溶存成分の定量に関するものはほとんどない。われわれは、図1に示すような、ゲル薄膜に含まれる溶質と雨中の溶存イオン成分による沈殿生成反応を利用することで、一滴の雨滴の成分を簡便に定量する手法の確立を目指してきた。その結果、硫酸塩について、本手法の検出感度と分析精度は、実環境試料に耐えうるレベルに到達したので、2020年度から実環境における雨滴や雲粒の採取を行なっている。この手法を用いた採取分析対象（図2）として、地表において観測された降水イベントにて初期降水の雨滴を採取した。また、富士山山頂測候所において、夏季に雲粒を採取した。さらに、ドローン採取として、採取ツールを温湿度センサーと併せて小型クアッドコプター（Mavic3, DJI 社）に搭載し（図3）、富士山麓5合目太郎坊から上空150 mへの飛行によって、雲粒を直接採取した。富士山は標高が高く自由対流圏に位置しており、また独立峰であることから、比較的近傍の汚染の影響を受けずに中国大陸から飛来するPM2.5などの汚染大気の長距離輸送の影響を観測することができる。雨滴と雲粒の粒径分布と、液滴中の硫酸塩濃度分布を比較することで、雲粒形成から降水までの成長過程の解明につながることを期待される。

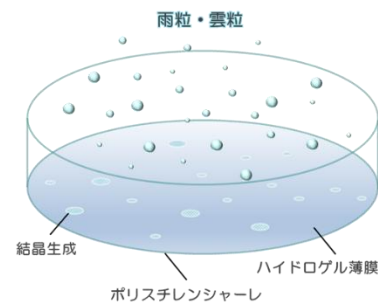


図1 結晶生成を利用した雨粒採取分析ツール

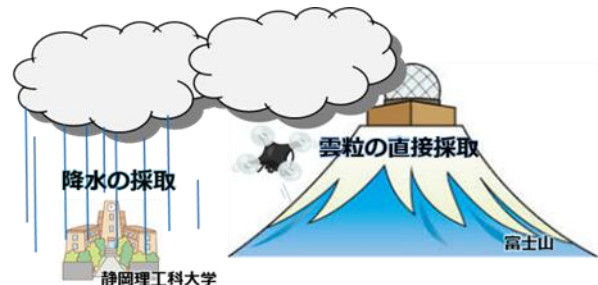


図2 地上と富士山頂におけるサンプリング



図3 雲粒採取に用いたクアッドコプター

2023-2024 年は、ドローン採取として、採取ツールを温湿度センサーと併せて小型クアッドコプター (Mavic3, DJI 社) に搭載し、富士山麓 5 合目太郎坊から上空 500 m への飛行によって雲粒を直接採取した。また、海洋起源の雲凝結核に加えて、火山由来の硫酸塩が豊富なハワイ島、マウイ島 (図 4) においても雲粒を採取した。雨滴に対する同様の検討では、降水イベントによって「雨滴体積」、「硫酸塩物質質量」、「硫酸塩濃度」の分布がそれぞれ狭い 3 つの異なるパターンが見られたのに対し、雲粒については、採取地や時期に関係なく、硫酸塩物質質量と濃度の相関係数が有意水準 1% を満たす「雲粒体積分布が狭い雲」が支配的であることが確認された。つまり、雲粒形成から降水までの成長過程の中に、パターン分岐の存在が示唆された。

ハワイで採取された雲粒を解析したところ、キラウエア火山のあるハワイ島の雲粒よりも、風下に存在するマウイ島の雲粒のほうが硫酸塩を多く含むことが明らかとなった。SO₂ ガスから硫酸塩エアロゾルへの酸化過程には時間を要することが知られており、移流過程で酸化された硫酸塩エアロゾルが凝結核となり雲粒生成したと考えられる。また、ハワイと富士山 5 合目で採取された雲粒を比較したところ、物質質量分布に大きな差は見られなかったのに対して、濃度範囲は富士山に比してハワイでは低くなり、雲滴の成長の影響が見られた。また、それらのデータを並べることで、雲粒の形成から降水までの成長過程の変遷が見えてきた。これは、雲粒の成長が場所や季節に依存せず、雲粒中の硫酸塩によって支配される法則に従っていることを示している。先行研究から、雲凝結核としては、海塩エアロゾルや硝酸塩エアロゾルが雲粒の形成に強く影響することが明らかになっているが、今回の結果から、硫酸塩エアロゾルの影響が特に重要であることが示唆された。この硫酸塩の雲粒成長に及ぼす影響を明らかにすることで、近年大きな問題となっている急激な雨雲発達メカニズム解明への寄与が期待される。これらの成果は、すでに国際論文誌への投稿を準備している。

【研究業績】

1. 南齋勉「ドローン飛行に関するルールとドローンを用いた雲粒サンプリング研究の紹介」大気環境学会第 65 年会 ドローン特別市民集会 2024.9.13.
2. 岡本大地, 南齋勉「富士山麓におけるドローン採取による単一雲滴分析に基づく雲成長過程の検討」大気環境学会第 65 年会 2024.9.13.
3. M. Shirakura, K. Murata, B. Nanzai, "Three distinct precipitation patterns characterized by sulfate analysis in individual raindrops" Aerosol and Air Quality Research 2025, in progress.
4. 岡本大地, 南齋勉「雲粒成長における硫酸塩の寄与に関する単一雲粒分析に基づく検討」大気環境学会第 66 年会 2025.9.17.



図4 火山性ガスが豊富なハワイ諸島での雲粒採取