

# ドローンで雲をつかむ ～雲滴分析による雲成長過程の研究～ (SR11)

南齋勉, 岡本大地, 藤田壱聖  
静岡理科大学 理工学部

## 1. はじめに

雨雲は雲滴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。雲滴の核形成から、雲滴への大気汚染物質の沈着、雲滴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<sup>1)9)</sup>、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結晶生成を利用することで、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<sup>7)</sup>。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てきたので、2020年度から実環境における雨滴や雲滴のサンプリングを行なっている。

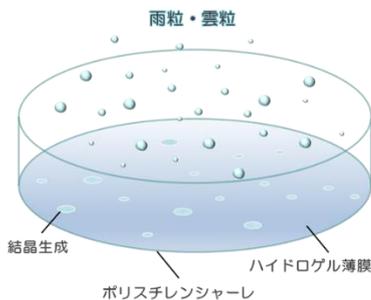


図1 結晶生成を利用した雨粒採取分析ツール

この手法を用いた採取分析対象として、地表(静岡県西部に位置する静岡理科大学)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、夏期に雲滴採取を行なった。さらに、ドローンサンプリングとして、富士山麓5目目太郎坊から上空150mへの飛行によって、雲滴採取した結果を解析した(図2)。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PM<sub>2.5</sub>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。雨滴と雲滴の粒径分布と、液滴中の硫酸塩濃度分布を比較することで、雲滴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。

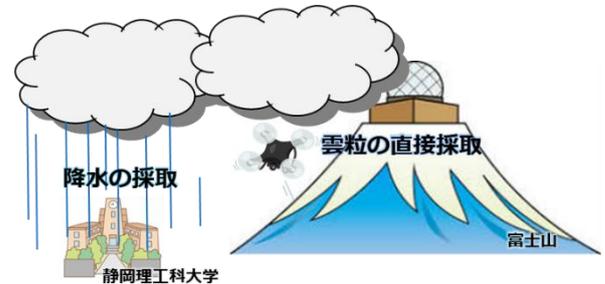


図2 地上と富士山頂におけるサンプリング

## 2. 採取と観察の方法

採取分析ツールは以下の手順に従い作製した。5mMの塩化バリウム水溶液に5wt%となるように牛骨ゼラチンを加え、加温しながら1時間攪拌させた。この溶液を内径35mmのポリスチレンシャーレに塗布し、減圧条件のデシケーター内で7日間静置して製膜乾燥させた後、アルミジップロック内にシリカゲルを同封して保存した。

雨滴の採取は、静岡県西部地域において2023年に観測された降水に対して、本採取ツールを3～10分間ずつ暴露し、数10～数100点の雨滴を経時的に採取した。雲滴採取は、この採取ツールを温湿度センサー(おんどり, T&D社)と併せて小型クアッドコプター(Mavic3, DJI社)に搭載し、約10分間の平均飛行時間で雲滴を直接採取した。採取は2023年3月から12月までの各月、富士山五合目の太郎坊(海拔1290m)にて、150～500 m上空の雲に対して行った。また、富士山頂における雲滴採取として、2023年7月26日から8月23日の期間に富士山測候所で採取された計16試料の雲滴についても同様に解析した。



図3 雲粒採取に用いたクアッドコプター

生成した沈殿物の観察にはデジタルマイクロスコープ (KEYENCE VHX-7000)を用い、撮影した単一雲滴の画像から、画像処理ソフトにより雲滴直径と白色沈殿のピクセル数を計測した。それらの情報から雲滴体積と硫酸塩物質量をそれぞれ見積もることで、個数分布や互いの相関について検討した。

### 3. 刻一刻と変わる雨の性質

単一雨滴の採取結果の例として、図2 (a) に2023年4月12日15:05~15:31に、静岡県掛川市で観測された降水イベントの初期降雨に対して、採取された雨滴中の硫酸塩濃度と物質量の相関を示す。時間の経過とともに比例関係の相関性が上昇することが分かるが、この相関において比例係数は雨滴体積を示しており、雨滴体積の分布が狭くなっていることが分かる。また、時間の経過とともに高い物質量の分布が増えていることが分かる。硫酸塩濃度の分布は、採取期間を通して $10^{-2}$ – $10$  mmol/L の間で大きく変化していないのに対し、硫酸塩物質量の分布は、 $10^{-1}$ – $10^2$  pmol にかけて時間の経過とともに増大していることが分かった。このことから、この降水イベントにおける雨滴の特徴は、雨滴体積分布が狭いパターンから雨滴中の硫酸塩物質量分布が狭いパターンに変遷していることが分かった。図2 (b)は前年の2022年3月26日に浜松市で観測された降水イベントの初期降雨に対して採取された雨滴中の硫酸塩濃度と物質量の相関を示しているが、どちらの分布も変遷の傾向が似ていることが分かる。この支配要因について、雲の移流過程や降水量の比較から共通点が見えてきた。

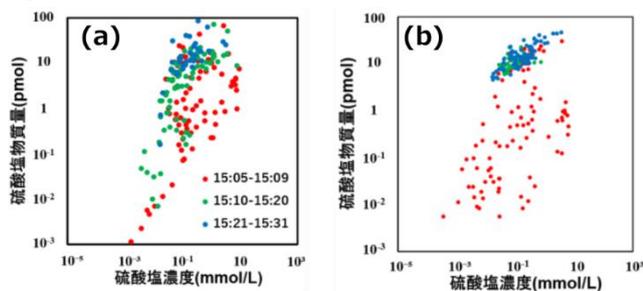


図4 単一雨滴中の硫酸塩濃度と物質量の相関  
(a) 2023.4.12 (b) 2022.3.26

### 4. 1滴の雲滴から雲の成長過程が見えてきた

図4は、2020年12月9日10時、2023年3月2日10時、2023年4月12日13時にそれぞれ太郎坊上空で採取された雲滴の液滴直径分布を示す。いずれの期間においても、同程度の雲滴直径の範囲内に入るものの、その傾向は採取時期によって大きく異なることが分かった。これまでの雲滴経時採取の結果から、雲滴跡の直径分布は時間とともに大きく推移することが分かっており、今回の結果も季節性に依存したものではない

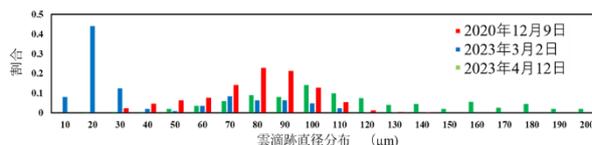


図5 異なる期間に採取された雲滴跡の直径分布

と考えられる。これらの雲滴中に含まれる硫酸塩の濃度と物質量の相関を取ると、いずれの試料についても比例に近い相関関係を示したことから、前述の雨滴の結果と同様に雲滴体積分布が狭い雲だったことが伺える。今回示したこれらの雲はすべて、西方から移流してきた気塊から生成した雲であることを目視で確認しているが雲滴体積分布に差が見られた。昨年までに得られた雲滴を見ると、いずれもこの体積分布が狭いパターンに該当するが、今年採取した雲滴の中には、図4に示した雨滴の結果と同様に、硫酸塩物質量の分布が狭い雲滴の存在も確認された。これらの結果から、雲滴の凝結形成から雨滴に成長する過程で、雲滴がもつ特徴が変遷することが示唆された。

### 5. おわりに

これまで雨滴には、①雨滴体積分布が狭いパターン、②雨滴中の硫酸塩物質量分布が狭いパターン、③硫酸塩濃度分布が狭いパターンの3種類が存在することが分かっていたが、今回の結果から、時間とともに雨の特徴が変遷して傾向が見られた。また、これまでに見られていた雲滴の解析結果からはパターン①のみが確認されていたが、今回初めて、パターン②の存在が明らかとなってきた。これらの詳細を検討することで、これまで未解明であった雲粒の凝結形成から成長過程の詳細が明らかとなる可能性が示された。

### 参考文献

- 1) M. Kasahara, S. Akashi, C.-J. Ma, and S. Tohno, *Atmos. Res.*, **2003**, 65, 251.
- 2) C.-J. Ma, S. Tohno, M. Kasahara, and S. Hayakawa, *Anal. Sci.*, **2006**, 22, 415.
- 3) K. Bächmann, I. Haag, T. Prokop, A. Röder, and P. Wagner, *J. Chromatogr., A*, **1993**, 643, 181.
- 4) A. Röder and K. Bächmann, *J. Chromatogr., A*, **1995**, 689, 305.
- 5) B. Tenberken, P. Ebert, M. Hartmann, M. Kiber, A. Mainka, T. Prokop, A. Röder, and K. Bächmann, *J. Chromatogr., A*, **1996**, 745, 209.
- 6) B. Tenberken and K. Bächmann, *J. Chromatogr., A*, **1997**, 775, 372.
- 7) B. Nanzai, Y. Goto, Y. Ishida, and M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2019**, 35, 1263.