

ドローン採取による雲滴分析 ～個々の雲滴から雲の情報を知る～

南齋勉¹, 神谷祐翔¹, 山本祐志², 大河内博³

1. 静岡理科大学, 2. グリーンブルー(株), 3. 早稲田大学

1. はじめに

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¹⁻⁶⁾、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^{7,8)}。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粒や雲粒のサンプリングを行なっている。

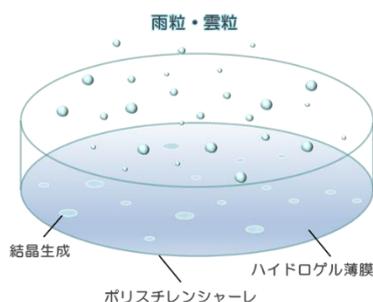


図1 結晶生成を利用した雨粒採取分析ツール

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粒を採取した。また、富士山山頂測候所において、夏期に雲粒採取を行なった。さらに、ドローンサンプリングとして、2020年12月9日に富士山麓5合目太郎坊から上空150mへの飛行によって、雲粒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_{2.5}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。雨粒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事が期待される。

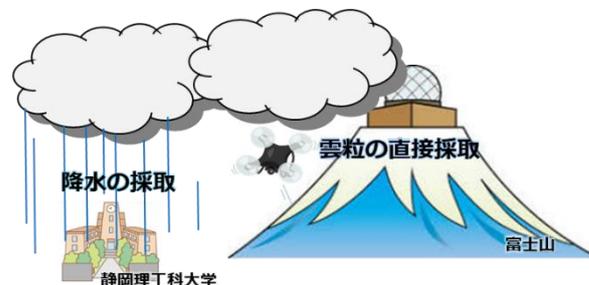


図2 地上と富士山頂におけるサンプリング

2. 採取と観察の方法

雨粒採取分析ツールは以下の手順に従って作製した。5 mM の塩化バリウム水溶液に 5wt% となるようにゼラチンを加え、加温しながら3時間攪拌させた。この溶液を内径33 mm 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2日間静置し、その後はアルミジップロック内に入れて保存した。降水を確認した際に、ツールをアルミジップロックから取り出し、シャーレの内面には塗布されたゲル薄膜上に雨粒が載るように3分間暴露し、シャーレの蓋を被せたのち、再びアルミジップロック内に収納した。

富士山頂における採取は、2022年8月17日10時から19時まで、1時間ごとに計10回の採取を行なった。当日、測候所は常に雲内に入っていた。

富士山5合目の太郎坊大気観測サイトにおけるドローンサンプリングは、以下のとおり行なった。小型マルチコプター Phantom4(グリーンブルー社;図3)上に採取ツールを貼付し、2020年12月9日8時から12時まで、高度1440mへの計4回のフライト(飛行時間:2~14 min)を行なった。

採取後の試料は、研究室に戻ったのち、デジタルマイクロ



図3 雲粒採取に用いたクアッドコプター

スコープ (KEYENCE VHX-7000) で、雨粒もしくは雲粒の浸透により生成した硫酸バリウムの結晶を撮影し、画像処理ソフトを用いて、液滴粒径と、結晶ピクセル数を計測し、それぞれの分布について検討した。

3. 一滴ごとの分析から雲粒の成長過程に迫る

図4に、2020年12月9日の4回のドローン採取で得られた試料についての雲滴跡の直径分布を示す。10–135 μmの範囲での分布が確認され、これまでに報告されている雲滴の粒径分布とおおよそ一致していた¹¹⁾。それぞれの採取期間における直径分布には違いがあることから、時間とともに雲内の状況が変化していることが伺える。08:00では、30–35 μmの小さな直径で極大を持ち、直径が大きくなるとともに単調に減少する分布が見られたが、10:35や11:02では、それぞれ75–80 μm、80–85 μmの大きな直径に極大をもつ分布が確認され、時間と共に直径が大きくなっていく傾向が見られた。また、10:45では30–100 μmで広く分布する結果となったが、10:35の採取時から11:02の採取前には小雨の降水が確認されたことから、10:45は降水中であることが分かる。これらの結果から、降水期間以外は、吸湿による雲滴の成長により、雲粒の粒径が揃ってくる成長過程が示唆され、降水期間では、大きく成長した雲滴が消失したと考えられる。

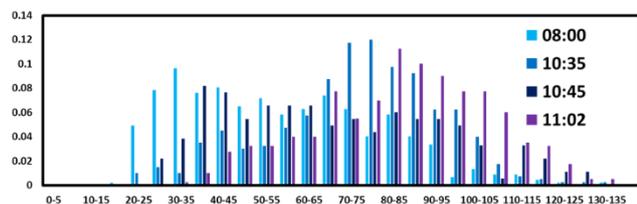


図4 太郎坊上空 (高度1440 m) でドローンにより採取された雲滴跡の直径分布

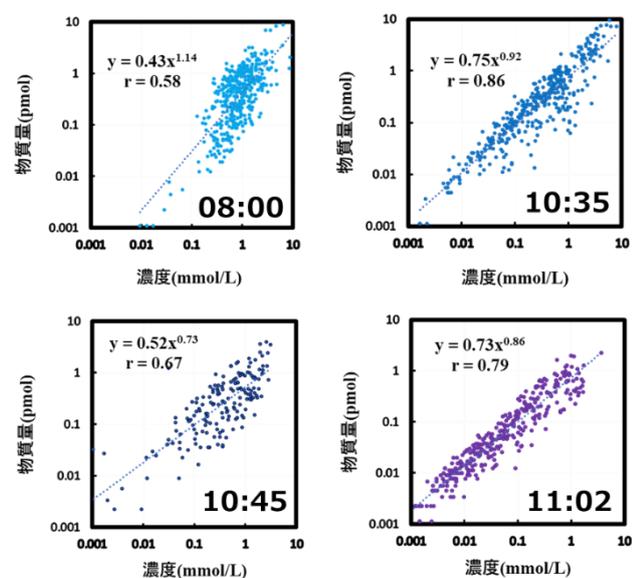


図5 太郎坊上空でドローン採取された雲滴中の硫酸塩濃度と硫酸塩物質量の相関関係

図5は4回のドローンサンプリングによって採取された雲滴について、個々の雲滴中に含まれる硫酸塩の濃度と物質量の相関関係を示す。雲滴粒径分布が小さい8:00や、降水が確認された10:45の採取期間でも同様の相関は見られたが、10:35と11:02のデータでは、より高い相関性が見られた。この直線的相関は、雲滴の体積分布が狭いことを示している。前述のような雲滴の吸湿成長によって、体積分布が収束してくると考えられる。本発表では、2022年夏期に富士山頂で採取された雲滴データや、地上で通年採取された雨滴の情報に関して検討した結果についても報告する。

4. おわりに

一滴ごとの雲滴や雨滴中に含まれる硫酸塩の物質量と、その液滴体積、それらから見積もった濃度の、それぞれの情報を並べてみることで、個々ではバラバラの情報を持つ雲滴が、それが含まれる雲全体の情報を示すことが分かってきた。さらに、その情報を経時的に並べて見ることで、雨雲の雲滴形成や成長の過程についての情報が得られる可能性が見えてきた。しかしながら、その支配要因や季節性などについては未解明の部分が多く、更なる採取分析を進めることで、より詳細な情報が得られることが期待される。

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) N. Tomikawa, B. Nanzai, and M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2011**, 27, 861.
- 8) B. Nanzai, Y. Goto, Y. Ishida, and M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2019**, 35, 1263.
- 9) J. Warner, *J. Atmos. Sci.*, **1969**, 26, 1272.
- 10) J. W. Fitzgerald and P. A. Spyers-Duran, *J. Appl. Meteorol.*, **1973**, 12, 511.
- 11) N. L. Miles, J. Verlinde, and E. E. Clothiaux, *J. Atmos. Sci.*, **2000**, 57, 295.