

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82405

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14793

研究課題名（和文）雲内および上空に存在する難培養微生物由来の雲凍結核の観測

研究課題名（英文）Observations of ice nucleating particles from unculturable microbes in the free troposphere

研究代表者

村田 浩太郎（Murata, Kotaro）

埼玉県環境科学国際センター・大気環境担当・技師

研究者番号：30740104

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：上空に存在する雲凍結核（氷晶核）の計測を富士山頂にて実施し、そのうちの生物起源粒子による画分の推定を行なった。はじめに、氷晶核計測装置を自作で構築し、2019年にテスト観測、2021年に本観測を実施した。それにより、夏季の富士山頂周辺の自由対流圏における氷晶核数濃度の特徴的な変動を明らかにすることができた。さらに、富士山表層堆積物の氷晶核としてのはたらきも評価し、表層堆積物由来の鉱物粒子と生物起源粒子が氷晶核数濃度に寄与していることを示す結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自由対流圏高度での大気中氷晶核および生物起源氷晶核の観測は世界的に少なく、とくに東アジアにはほとんどない。本研究により、不足している東アジアでの上空データを補間できる点で学術的意義がある。また、氷晶核の観測データを得ることは、雲物理や降水形成への理解を進展させ、将来的に気象や気候の予測精度を向上させる点において社会的意義があるといえる。

研究成果の概要（英文）：Ice-nucleating particles in the free troposphere were measured at the summit of Mt. Fuji, and the fraction of biogenic origin was estimated. A device for measuring ice-nucleating particles was constructed and applied to test observations in 2019 and full-scale observations in 2021. The measurements revealed characteristic variations in the ice-nucleating particle concentrations in the free troposphere around the summit of Mt. Fuji. A potential function of the surface deposits of Mt. Fuji as ice-nucleating particles was also evaluated. The results showed that mineral and biogenic particles derived from the surface deposits contributed to the ice-nucleating particle concentrations in the atmosphere.

研究分野：大気科学

キーワード：氷晶核 バイオエアロゾル 富士山

1. 研究開始当初の背景

大気科学や気象学における新しい仮説として、上空で微生物が氷晶核（ここでは水の凍結において核となる凍結核を指す）としてはたらき、雲物理や降水過程を媒介しているといわれている。このような微生物は「氷核活性微生物」と呼ばれ、特殊なタンパク質によって水の凍結を誘発する。大気中には氷晶核となる鉱物ダストが豊富に存在するものの、氷核活性微生物は極端に強い凍結誘発能力を有するために、わずかな数量でも雲の水形成にはたらきかけると考えられている。過去の様々な観測結果は仮説を間接的に支持しているものの、微生物は培養不可能なものが多いことを占めるため、全貌は明らかになっていない。培養できない微生物も含めた上空での氷晶核観測が必要とされていた。

2. 研究の目的

微生物起源凍結核を評価する手法を確立し、富士山頂（3,776 m）における雲内および高高度に存在する氷晶核および微生物叢の全体像を明らかにする。これにより、微生物が雲物理や降水過程を媒介する一要素であるという仮説の検証に資する観測知見を得る。

3. 研究の方法

氷晶核の計測方法として、現在広く用いられている液滴凍結法を用いることにした。原理としては、フィルターに採取した粒子を超純水に懸濁させ、その液滴の凍結温度によって氷晶核数を計測する方法である。市販の氷晶核計測装置はないため、近年同装置を構築した実績のあるアメリカ海洋大気庁の研究者らに助言を受けて自作した。また、過去の文献によると、大気中の生物起源氷晶核は熱処理によってそのはたらきが失活するといわれている [1]。そこで、微生物起源氷晶核のスクリーニングテストとして加熱処理も同時に行なった。

2019年7月14日から8月26日と、2021年7月12日から8月28日に、富士山頂測候所において観測を実施した。大気中の微粒子をフィルター上に吸引捕集して試料とした。試料回収・保存に関しては、NPO 法人富士山測候所を活用する会の山頂常駐スタッフの協力で実施した。冷蔵して持ち帰った試料について、液滴凍結法により大気中氷晶核数濃度を算出した。さらに同じ試料に対して 95°C で 1 時間の加熱処理を行うことで、熱による失活で減少した画分を生物起源氷晶核数とした。また、2019年のテスト観測試料については、大気中細菌の群集解析も実施した（外注依頼）。フィルターから DNA を抽出し、細菌の 16S rRNA 遺伝子配列を PCR 増幅して次世代シーケンサーによって細菌群を解析した。

なお、富士山測候所は安全性や運用上の理由から 7~8 月しか利用できず、2020 年については新型コロナウイルスの影響で完全閉鎖となったために全く観測ができなかった。観測の代替として、2020 年は富士山の火山堆積物の氷晶核としてのはたらきを評価するために、関係省庁の許可・承諾を得た上で登山道において堆積物採取を実施した。堆積物は粉碎後に超純水に懸濁させ、沈降速度の差によって約 5 μm 以下の粒子を選別した。得られた粒子懸濁液に含まれる総粒子数および粒径分布を計測した上で氷晶核数を計測することで、単位重量および単位表面積あたりの氷晶核数を算出した。

4. 研究成果

2019 年夏季および 2021 年夏季に富士山頂で得られた大気中氷晶核数濃度を図 1 に示す。横軸が活性化温度（氷晶核としてはたらく温度）で縦軸が氷晶核数濃度（0°C、1 気圧の空気 1 L あたり）である。2019 年と 2021 年とでは採取時間と頻度が大きく異なっていたが、濃度変動の範囲としては概ね同様であった。しかし、2021 年では活性化温度 -25°C 以上において高濃度の氷晶核が観測された。

氷晶核数濃度の時間変化を見るために、-30、-25、-20、-15、-10°C の活性化温度における氷晶核数を切り出し、積み上げ棒グラフとして示したのが図 2 である。2019 年のデータの時間分解能は非常に低いものの、期間中の平均的な濃度は捉えていたと考えられる。棒グラフの斜線部分は加熱処理により消失した画分、すなわち、生物起源氷晶核であった可能性が高いものを示している。とくに、活性化温度 -10°C（非常に効率的な氷晶核）以上のほとんどが生物起源氷晶核である可能性が見出された。

富士山頂における特徴的な現象として、日中に高く夜間に低い日内変動が見られた。日中は表層堆積物等の粒子が大気中に飛散することが過去の研究から知られている [2]。鉱物粒子は氷晶核としてはたらくため、日中に飛散した堆積物由来鉱物によって氷晶核数濃度が上昇したと考えられる。実際に、富士山表層堆積物の氷晶核としてのはたらきは先行研究で報告されている鉱物ダストよりも比較的高く、有効な氷晶核となりうる結果が得られた。このことから、山頂で計測された PM_{2.5} 中のアルミニウム濃度から大気中浮遊鉱物粒子を推定し、大気中氷晶核数濃度を逆算したところ、活性化温度が低い領域については濃度を説明し得る推定結果が得られた（図

3)。一方で、活性化温度の高い領域の氷晶核については鉱物だけで説明がつかなかった。この部分については、熱を加えることで消失してしまったため、生物起源氷晶核であったと推察される(図3赤色部分)。すなわち、山頂大気中における日中の氷晶核数濃度の上昇には、山体表層堆積物由来の鉱物と生物粒子が山頂氷晶核に寄与していたことが推察された。

2019年には微生物組成のデータを得ることができたため、生物起源氷晶核が寄与していると考えられる活性化温度 -12°C 以上の氷晶核数濃度 [3] との関係性を検討した。その結果、生物起源氷晶核が検出されるときには、氷核活性微生物と知られる *Pseudomonas* 属が存在する傾向であることが分かった(図4)。*Pseudomonas* 属は降水からも検出され、雲物理に関与している可能性が報告されている [4]。極めて少ないデータではあるが、富士山頂においてもこの属が関与している可能性が示唆された。

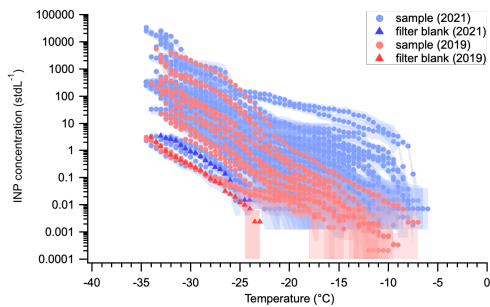


図1: 富士山頂大気中における氷晶核数濃度のスペクトル。横軸が活性化温度で縦軸が氷晶核数濃度である。

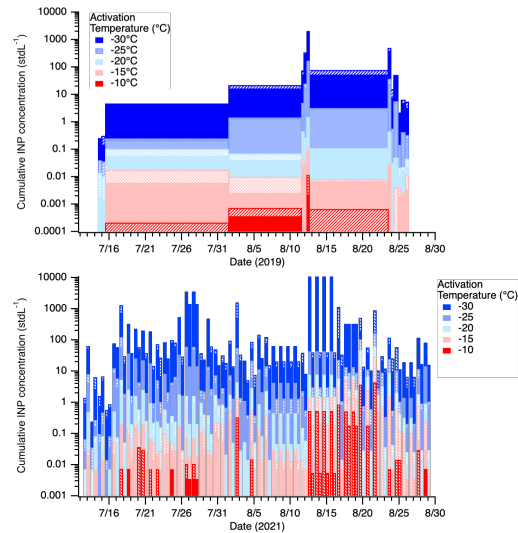


図2: 富士山頂大気中における氷晶核数濃度の時間変化。上が2019年の結果で、下が2021年の結果を示す。斜線部は熱処理によって消失した画分で、生物起源氷晶核である可能性がある。

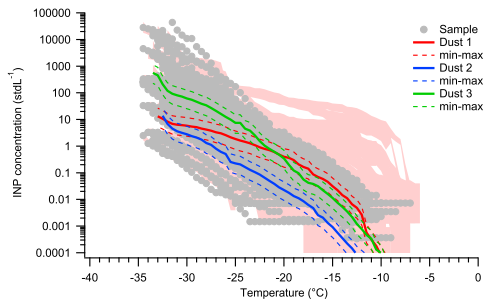


図3: 富士山頂における推定鉱物粒子濃度から逆算した氷晶核数濃度 (Dust 1-3) と熱処理後の氷晶核数濃度 (灰色)。赤色の影は熱処理によって消失した画分で、生物起源氷晶核である可能性がある。

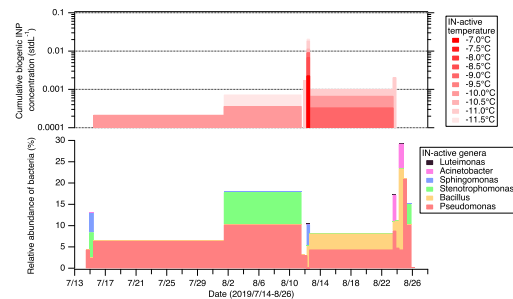


図4: 2019年の氷晶核数濃度 ($>-12^{\circ}\text{C}$) の時間変動と対応する既知の氷核活性細菌属の割合の時間変化。

<引用文献>

- [1] D. O'Sullivan et al. "Contributions of biogenic material to the atmospheric ice-nucleating particle population in North Western Europe". In: *Scientific Reports* 8.1 (2018), p. 13821. DOI: 10.1038/s41598-018-31981-7.
- [2] 小林 拓, 三浦 和彦, 兼保 直樹, 五十嵐 康人. "夏季富士山頂で測定された不溶性粒子の粒径分布". In: *エアロゾル研究* 25.2 (2010), pp. 167-176. DOI: 10.11203/jar.25.167.
- [3] B. J. Murray, D. O'Sullivan, J. D. Atkinson, and M. E. Webb. "Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets". In: *Chemical Society Reviews* 41.19 (2012), pp. 6519-6554. ISSN: 0306-0012. DOI: 10.1039/c2cs35200a.
- [4] C. L. Monteil, M. Bardin, and C. E. Morris. "Features of air masses associated with the deposition of *Pseudomonas syringae* and *Botrytis cinerea* by rain and snowfall". In: *The ISME Journal* 8.11 (2014), pp. 2290-2304. ISSN: 1751-7362. DOI: 10.1038/ismej.2014.55.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kotaro Murata, Hiroshi Okochi, Masashi Kamogawa
2. 発表標題 Ice-nucleating Particle Concentration and Bacterial Composition at the Summit of Mt. Fuji in the Free Troposphere: Observation in July and August 2019
3. 学会等名 European Aerosol Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田浩太郎、西貝茂辰、大河内博、鴨川仁
2. 発表標題 第一回緊急事態宣言時から解除後にかけての都市大気バイオエアロゾルの動態
3. 学会等名 第62回大気環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田浩太郎、米持真一、大河内博、鴨川仁
2. 発表標題 雲や雨の種になる粒子を探す - 富士山頂での氷晶核観測2021
3. 学会等名 認定NPO法人富士山測候所を活用する会第15回成果報告会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐々木一哉、片山葉子、松田千夏、土器屋由紀子	4. 発行年 2022年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 223
3. 書名 富士山測候所のはなし 日本一高いところにある研究施設（第2部第2章の2：「氷晶核としてはたらく微生物」を執筆）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------