

山岳域におけるエアロゾルの化学分析

早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科 教授 おおこうち ひろし 大河内 博

人はなぜ山に登るのか？

昔から「人はなぜ山に登るのか？」という問いがあります。「そこにあるから (Because it's there.)」(ジョージ・マロリー)、「そこに俺がいるから」(羽生丈二 映画「エヴェレスト 神々の山嶺」)と、登山家は答えています。日本では江戸時代に「講」が流行り、信仰として、富士山への参拝登山、大山参りなどが盛んに行われていたようです。最近では中高年、山ガールと呼ばれる女性を中心に登山ブームです。日本ではレジャー登山が主流であり、登山人口は2014年で860万人です。その約4割は60代以上であり、健康増進が主な理由のようです。

山に登ると、都会の喧噪から解放されます。空気が美味しく感じられ、思わず深呼吸をしたくなります。では山の空気はどのような化学物質を含んでいるのでしょうか？ 空気を構成する主要気体の組成は地上と変わりません。上空にいくほど気圧が下がり、空気は薄くなります。酸欠となり、高山病にかかります。富士山頂の気圧は地上の約2/3です。

大気汚染物質の濃度や組成はどうでしょうか。登山をしたときに、山頂で思いっきり深呼吸してもいいのでしょうか？ 実は、山岳域の空気が地上部に比べてどれくらい綺麗なのかよく分かっていません。人も住んでいないのに、なぜ山に登って空気を調べる必要があるのか、なぜエアロゾルの化学組成を調べる必要があるのか、現在、何が分かっているのかを富士山でのエアロゾル観測を紹介

しながら説明します。

山は雲が生まれる場所

山の空気が地上と大きく異なるのは、雲があることです。山の斜面では複雑な気流が起こり、さまざまな雲が絶え間なく出現します。富士山をはじめとして、標高の高い山では四季折々に特徴ある雲を見ることができます。童謡“ふじの山”で「あたまを雲の上に出し♪」と歌われているように、夏の晴れた日に、富士山頂から見下ろすと、眼下に広大な雲海を見渡すことができます。地上から富士山頂を見上げると、山頂だけ傘を被ったように見えたり(笠雲)、山頂から少し離れた風下側に楕円や翼の形をしたレンズ状の雲(吊し雲)を見つけることができます。山は雲が次から次へと生まれる場所です(写真1)。

雲(霧)はガスではない

雲が地面に接触したものを霧と呼んでいます。登山者から見ると霧であっても、地上から山を見ている人にとって雲です。雲と霧の区別はあいまいです。

登山者は、雲(霧)が発生して視界が悪くなると、よく「ガスってきた」と言います。雲は、水蒸気(気体)が冷やされて水滴(液体)に変わったものであり、ガスではありません。「ガスる」という用語は、あくまでも登山用語として用いられているようです。もしかしたら、やかんから出る「湯気」が白く

見えるのをイメージしたかもしれません。「湯気」は、高温水蒸気が空気中で冷やされて生成した水滴です。「湯気」という文字は気体の「気」を含みますので、気体と誤解した可能性があります。

では、水蒸気があれば雲がすぐに生成するのでしょうか。雲が生成するには雲の核になる“ちり（エアロゾル）”が必要になります。

エアロゾルが雲を作る

エアロゾルとは、大気中に浮遊している固体または液体の小さな粒子で、大きさは0.03～100 μm 程度です。人が肉眼で見える大きさが100 μm (0.1 mm) くらいなので、エアロゾルを肉眼で見ることにはできません。ただし、10 μm より大きい粒子は重力によって沈降しやすいので、上昇気流によって上空まで運ばれて雲を作るエアロゾルは数 μm の小さい粒子です。エアロゾルに水蒸気が凝結して雲粒ができます。雲粒の大きさは直径10 μm (0.01 mm) 程度であり、大きさで言えばエアロゾルに含まれますが、エアロゾルとは区別します。ちなみに、雲粒同士が衝突してできた雨粒は直径1 mmを越えます。

エアロゾルは大きさ、個数だけではなく、どのような化学物質から構成されているのが重要です。そのため、エアロゾルの化学分析を行う必要があります。エアロゾルの化学組成が雲粒の化学組成に大きな影響を与えます。水を吸収しやすい性質（吸湿性）をもつ化学物質で構成されているエアロゾルは、水滴を作りやすくなります。このようなエアロゾルを凝結核と呼んでいます。すべての凝結核が雲粒まで成長できるわけではありません。凝結核のうち、雲粒の大きさまで成長させるものを雲凝結核（雲核）と呼んでいます。主な雲核としては、海水が波しぶきとなって蒸発してできる海塩粒子、二酸化硫黄から大気中で酸化生成する硫酸塩エアロゾルがあります。硫酸塩エアロゾルはPM2.5の主要

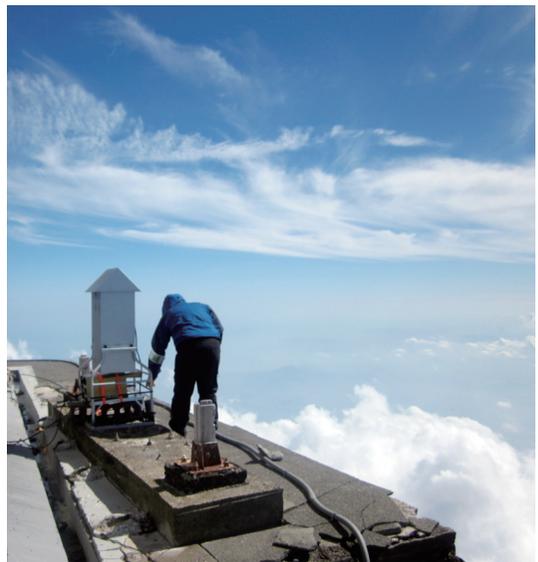


写真1 富士山頂でのエアロゾル（PM2.5）の観測風景
富士山頂ではさまざまな雲が見られる。

構成成分です。

なぜ山で空気の化学組成を調べるのか？

日本は国土面積の約70 %が山岳であり、森林が67 %を占めています。気候区分によっても異なりますが、高山を除いて山は森林に覆われています。例えば、中央アルプスや富士山の森林限界は約2,500 mであり、それより低山はほぼ森林に覆われています。森林は人が生きていく上で不可欠な空気を作り、水を保持・浄化して大切な飲料水の源水を作ってくれます。

山の空気を調べる理由の一つは、山の空気が汚れると、森林生態系の破壊を引き起こすからです。森林生態系が破壊されると、保水能力が低下し、降った雨がそのまま地表を流れ、土砂崩れや洪水が発生しやすくなります。日本では1980年代後半から1990年にかけて、山岳を中心にモミヤブナなどの立ち枯れが報告されるようになりました。その原因を調べるために、都市近郊の山岳で大気汚染観測が本格的に始まりました。丹沢大山（神奈川県）では、1980年代後半から神奈川大学グループによりガス、エアロゾル、雲、雨に関

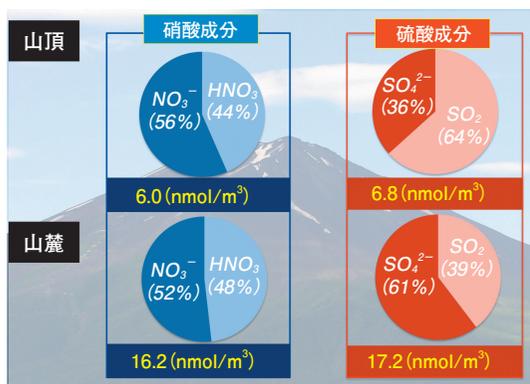


図1 富士山頂と南東麓におけるガス・エアロゾルの濃度と割合 2009年～2015年

する長期大気汚染観測が現在も続けられています (井川学・大河内博, 2009)。

山の空気質を調べるもう一つの理由は、地球規模での大気汚染の現状を把握し、空気質の変化を早期に検出し、将来の地球環境を予測して対策を講じることにあります。高度2,000 mを越える空気層は、地表からの直接的な影響を受けることが少ない空気層であり、自由対流圏と呼ばれています。自由対流圏は地上に比べて清浄であり、地球規模の空気質を調べることができます。自由対流圏は空気の動きを遮るものがないので、風が強いという特徴があります。大気汚染物質が自由対流圏まで運ばれると、地球全体に汚染が広がることとなります。高高度の空気質は航空機を使って観測されますが、航空機は高額であり、常に観測を行うことはできません。そこで、自由対流圏の空気質を調べるために標高の高い山岳が使われます。富士山は日本最高峰であり、山岳を用いて自由対流圏の空気質を調べるには最適の場所と言えます。

地球規模の 空気質観測拠点としての富士山

富士山は北緯35°付近に位置し、山頂は自由対流圏高度にあります。富士山はアジア大陸から太平洋へ輸送される大気汚染物質の出口にあたることから、アジア大陸から北米大

陸に至る大陸間輸送を監視するのに最適な位置にあります。一方、富士山は太平洋からアジア大陸に向かう清浄な海洋大気の入口にあたることから、東アジア地域のバックグラウンド濃度を観測することも可能です。

富士山は地球規模の空気質の観測のみならず、その山容を活かした空気の鉛直観測も可能です。例えば、夏季日中の上昇流に伴う地上から自由対流圏への大気汚染物質の移流過程、大気汚染物質の雲内および雲底下洗浄過程、紫外線強度の強い雲頂部における液相を介した光化学反応の解明が期待できます。

富士山における夏季エアロゾルの特徴

図1には、富士山頂 (3,776 m) と富士山南東麓・御殿場口太郎坊 (約1,300 m) における、夏季集中観測期間中 (7月と8月) のエアロゾルとガスの硝酸成分と硫酸成分の濃度とその割合を示しています。山頂、山麓ともに硫酸成分がわずかに高い傾向にあります。山麓と比べると、山頂では硝酸成分、硫酸成分ともに低濃度であり、どちらも2/5でした。

ガスとエアロゾルの割合をみると、硝酸成分ではエアロゾル (NO₃⁻) とガス (HNO₃) の割合は山頂と山麓で同程度でした。一方、硫酸成分では山頂と山麓で割合が異なり、山頂でガス (SO₂) がエアロゾル (SO₄²⁻) より高く、山麓ではその割合が逆転しています。山頂では長距離輸送されてきた空気質を観測していますので、本来であればSO₂が硫酸塩 (SO₄²⁻) に酸化されているはずですが、なぜSO₂のまま富士山まで空気が運ばれてくるのかは謎です。

図2には、富士山頂に空気が運ばれてくる方向に分けてガスとエアロゾルの濃度を分類して示しました。山頂に運ばれてくる空気を海洋、大陸北部、大陸南部に分けて、それぞれの区分ごとに硫酸成分、硝酸成分の平均濃度を示しています。山頂の空気が海洋からの影響を強く受けているときには、硫酸成分、

硝酸成分とともにガス・エアロゾル成分濃度は低いことが分かります。一方、大陸の影響を受けているときには北部、南部ともに高濃度でした。試料数は少ないのですが、大陸北部から空気が流入するときに最も高濃度であり、硫酸成分ではエアロゾル (SO_4^{2-}) の割合がガス (SO_2) よりも高いことが分かりました。硝酸成分ではガス (HNO_3) が検出されませんでした。このように、空気塊が運ばれてくる地域によってエアロゾルやガスの濃度や組成が異なります。

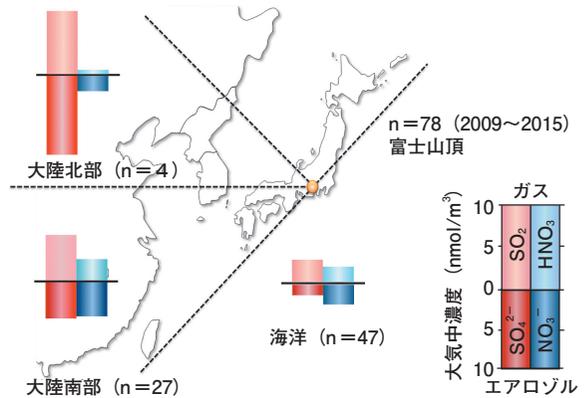


図2 富士山頂における空気塊別のガスとエアロゾルの濃度 2009年～2015年

ガス—エアロゾル—雲相互作用

エアロゾルを核として雲粒が生成すると、ガスを吸収します。吸収されたガスは雲粒内で反応し、雲が消失するとエアロゾルを生成します。再び、エアロゾルを核として雲粒を生成します。このようなサイクルをガス—エアロゾル—雲相互作用と言います。このサイクルを通じて空気質が変化するとともに、雲粒が雨粒まで成長すると、やがて地上に落下します。この過程は、空気中の汚染物質を除去してくれますので降水洗浄と呼んでいます。

ガス—エアロゾル—雲相互作用を地上で観測することはできませんが、富士山頂では雲が頻繁に生成するので観測が可能です。図3は、富士山頂でガスとエアロゾル（図3：中段）、雲水（図3：下段）を同時採取し、硫酸成分を分析した結果です。雲が生成しているときは、エアロゾルはほぼ検出されませんが、気温が上昇して雲が消失すると、エアロゾルが急激に増加していることが分かります。

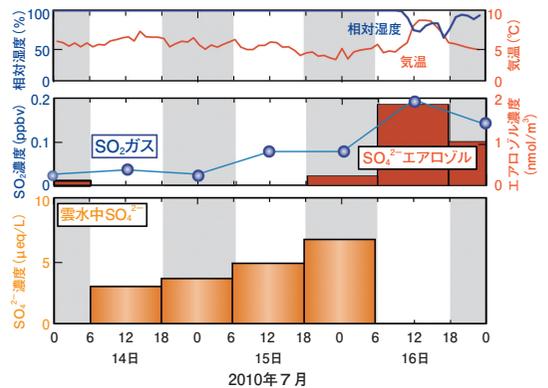
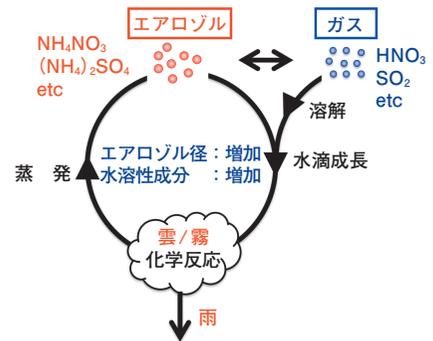


図3 富士山頂における硫酸成分のガス、エアロゾル、雲水中濃度の経時変化

おわりに

本稿では、越境大気汚染、大気化学反応の観点からエアロゾルの雲生成能に着目して、エアロゾルの化学組成について解説しました。

エアロゾルは、気候変動の視点からは化学組成に応じて地球を暖めたり、冷やしたりする働き（直接効果）、雲を生成して太陽光を反射しやすくなる間接効果があります。本稿では触れませんでした。三浦先生の稿で説明されています。合わせて読んでいただければ幸いです。