

## 山岳を用いた大気汚染観測：富士山頂の観測を中心に\*

土器屋 由紀子\*\*

### 1. はじめに

近年、高所山岳を利用した大気汚染観測が自由対流圏における航空機観測の補完として、また連続観測の手段として再評価されている。その中心となっているのが米国ハワイ島 Mauna Loa 観測所の発信するデータであり、2000年以降アジア各地に設立された観測所のネットワークである。

歴史的にみると、ヨーロッパアルプスでは19世紀より山岳大気への関心が散見される。Colle Gnifetti の氷柱の硫酸イオン濃度観測（第1図<sup>1)</sup>で知られるスイス・イタリア国境 Monte Rosa 山頂（4559 m）の Capanna Regina Margherita (CRM) は1893年当時医学研究の目的で設立された研究施設である。世界気象機関 (World Meteorological Organization, WMO)/全球大気監視計画 (Global Atmospheric Watch, GAW) ステーションの中にはこのようなヨーロッパの歴史的な施設が含まれており、最近では地球環境問題に利用されている<sup>2)</sup>。また、1931年に設立された Jungfraujoch 高所研究ステーションはヨーロッパ最高所（3500 m）の大気化学研究サイトである。それ以外にも高所医学や宇宙線科学などの目的で設立されたステーションが最近では大気汚染観測に利用され、その重要性を増している。

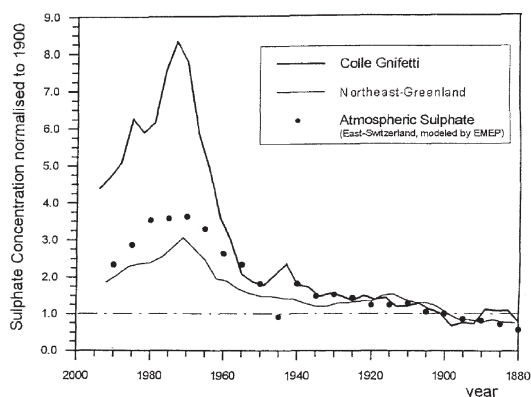
米国ハワイ島の Mauna Loa 観測所は、1951年、米国気象測候所として4100 m の山頂付近に設置されたものが1956年に現在の3396 m に移転し、CO<sub>2</sub>はじめ大気化学観測を開始した<sup>3)</sup>。

我が国では、1932年より有人の気象観測を行って

\* Atmospheric chemistry utilizing high mountains : Observation at the summit of Mt. Fuji.

\*\* Yukiko DOKIYA, 江戸川大学社会学部ライフデザイン学科.

© 2007 日本気象学会



第1図 アルプス及びグリーンランド氷柱の示す20世紀の硫酸イオン濃度<sup>1)</sup>。

た富士山測候所（3776 m）が年間を通してほとんどの期間自由対流圏中にあるという条件を満たしている。そのため大気汚染の長距離輸送の観測に適したサイトであるが、その大気化学観測への利用は限られていた。1981年7～12月に東北大学中澤高清らによって富士山頂のCO<sub>2</sub>の連続観測<sup>4)</sup>が行われたが、気象観測との折り合いで継続されなかった。

本稿では、1990年以來富士山測候所で行われてきた我々の大気化学観測を時系列で示し、山岳大気汚染観測の一側面を紹介し、最後に今後東アジア域のネットワークに占める富士山の位置と2007年に始まった新しい観測体制を紹介したい。

### 2. 手探りの観測（1990-1992）：降水の化学成分中心

1990年に植物学者の丸田恵美子とともに「富士山にも酸性雨が降るか」をしらべるため、気象大学の学生を伴い山頂に登ったのが最初である。富士山の降水の化学成分については、1940年代後半に名古屋大学の

小山忠四郎<sup>5)</sup>によって、霧氷の測定が行われた以外は報告がなかった。

強風により山頂では降水量の継続的な観測値がないことを知り、実際測候所の周りに4点で試料を取って見たところ、降水採取量に5倍以上の違いがあった。しかし、それらの化学成分濃度は殆ど同じである事がわかった<sup>6)</sup>。手作りのプラスチックサンプラーを測候所屋根に置き随時回収し、1992年までに30個の試料を採取し、東南東斜面1300 mの太郎坊の降水と比較して、気象データとあわせて季節変化や鉛直変化について報告した<sup>7,8)</sup>。山頂の降水の化学成分濃度は太郎坊のものに比べて非常に希薄であったが、夏季には硫酸イオン濃度などは若干高くなった。また、その高濃度は主として梅雨前線などによるものであった。

### 3. 夏季滞頂観測のスタート (1992-1994) : エアロゾル中心

1992年から気象研究所物理気象研究部(当時)の堤之智らが、富士山測候所で地表オゾンの連続観測を始めた。我々も滞頂観測を模索していたが、この年から夏季に数日間の滞在が許され、気象大学校学生の坪井一寛がエアロゾルや微量気体の採取を試みた。この年は使用したフィルターに含まれる測定対象成分濃度が無視できないほど高かったため、汚染物質濃度の詳細については、はっきりした結果が得られなかった。1993年は慶応大学・田中茂研究室との共同研究で、より精製されたフィルターや、拡散スクラバーを用いて観測を行った結果、台風通過前後の風向が変わったと同時に硫酸イオン濃度が上昇するなど発生源を推定させるデータが得られた(第2図)。オゾン濃度と硫酸イオン濃度がよい相関を示したこともあり、大気汚染物質の長距離輸送の観測における富士山頂利用の展望が開けたのはこの観測からである<sup>9,10)</sup>。1994年からは、気象研究所の五十嵐康人が加わり、宇宙線生成核種ベリリウム-7(Be-7)の測定も行った。気象条件は前年ほど恵まれなかったが、前年との比較で関東地方の上空の汚染の影響などを含む新しい知見が得られた<sup>11)</sup>。

### 4. 夏季集中観測と通年利用 (1997-2004) : 微量気体

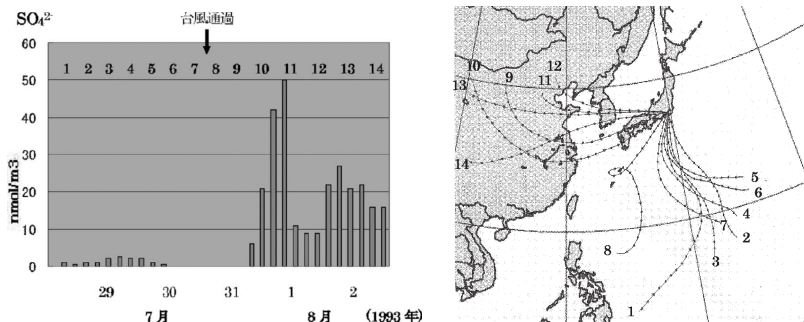
1997年以後、気象研究所での予算が認められ、富士山の大气化学集中観測が堤、五十嵐を中心に行われるようになった。機材の購入が可能になり、それまでの手作りの装置で行っていた観測にエアロゾル採取のためのハイポリウムエアサンプラー、CO、H<sub>2</sub>測定用の非分散赤外分光器などの装置が使用可能になった。1997年からは気象研究所、気象大学校、東京農工大学などの共同で夏季集中観測が行われた。

一方、1996年以来、名古屋大学の岩坂泰信、長田和雄らが大学院生とともに気象大学校に集まり、山岳を利用した大気化学の研究会が始まっていた。堤らによるオゾン濃度のデータが報告され<sup>12,13)</sup>、富士山頂がほとんどの時間、自由対流圏の中に存在するという議論がこの頃活発に行われた。

2000年には、つくばで「国際酸性雨学会」が行われ、富士山の降水と霧に含まれる化学成分濃度が、それぞれ異なる発生源を反映することについて林和彦らが報告した<sup>14)</sup>。

前述のように1990年代以来、自由対流圏の観測に航空機の補完として高所山岳を使うことが注目を浴び始めていた。ヨーロッパの若手研究者たちによる“Cloud Multi-phase Processes and High Alpine Air and Snow Chemistry”<sup>1)</sup>が出版された。1999年には我々が日本化学会・酸性雨研究会主催のシンポジウムで「酸性雨と山岳大気観測」を取り上げた。その参加者を中心に日本の山岳大気化学に関する研究などを「山の大气環境科学」<sup>15)</sup>にまとめた。

一方、気象庁の業務としての富士山測候所の位置づけが大きく変わった。台風観測の主役だった富士山



第2図 富士山頂のエアロゾルの硫酸イオン濃度と後方流跡線(1993年7月29日～8月2日, Dokiya *et al.*<sup>10)</sup>より作成, 左図の番号は右図の後方流跡線の番号と対応している)。

レーダーは衛星観測がその役割をほとんど代行するようになり、1997年には更新の予算が付かなかった。そのため、1999年9月で従来の観測を打ち切り、2001年には、それまで富士山頂の象徴的な存在であったレーダードームが解体撤去された。後は地上観測のみとなり、72年間続けた有人観測の歴史も見直しが迫られていた。冬季の交代勤務で過去に4名の殉職者を出し、公務員として日本一危険な勤務地と言われたような激務であったことも一因となり、存続の困難が論じられていた。

### 5. 微量気体、ブラックカーボン (BC) ほか

これまでの観測で面白いことがわかってきたため、測定項目や測定期間を拡大したいという要望が出始めた。2000年には、測候所の協力もあり9月に3週間の集中観測を実施することができた。2002年からは科学研究費による「大規模鉛直混合と拡散に関する自由対流圏大気化学の観測研究」や「山岳大気的气体およびエアロゾルの化学成分に関する観測的研究」そして「東アジアにおけるエアロゾルの大気環境インパクト」も始まり、研究グループは拡大した。島根県職員の吉岡勝廣 (ラドン Rn)、産総研の兼保直樹 (黒色炭素粒子 [ブラックカーボン BC])、農工大の片山葉子 (微生物、硫化カルボニル COS)、気象研の澤 庸介 (O<sub>3</sub>, CO, H<sub>2</sub>)・直江寛明 (個別粒子の電子顕微鏡観察)、富士山測候所の高橋 宙 (パーティクルカウンター-OPC) らが集中観測の常連となった。筆者は2002年3月に農工大を定年になり、江戸川大学に就職したため江戸川大学の学生も観測補助に参加した。

観測の内容も大幅に増強された。2000年以降、レーダー観測の終了に伴い利用可能になった測候所内の準備室でSO<sub>2</sub>、Rn、BC、CO<sub>2</sub>、エアロゾルなども、1992年から続けられていたO<sub>3</sub>に加えて通年で観測できるようになった。そのころのトピックスを以下に紹介する。

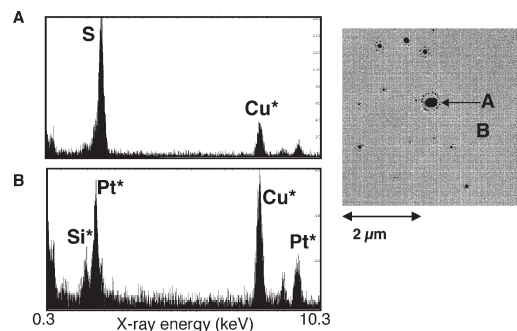
2000年7～8月の三宅島雄山の噴火にともなって大量のSO<sub>2</sub>が放出された。9月の集中観測中にはエアロゾルのSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が上昇するなどの結果が得られた<sup>16)</sup>が、これを機に五十嵐はSO<sub>2</sub>の連続測定を開始した<sup>17,18)</sup>。その結果、富士山頂のSO<sub>2</sub>濃度変動の特徴は、ごく低濃度レベルのバックグラウンド (BG) とイベント的な高濃度事象が見られ、汚染大気塊などの自由対流圏への輸送がない場合のBGは装置の検出限界付近であった。噴煙高度が1.2 km 付近といわれる三

宅島の影響は少なく、高濃度事象は大陸起源のものと考えられた。また、同時に測定していたRn、COとの関係が明らかになった。三者の間には正の相関がある場合が多いが、RnとCOが上昇してもSO<sub>2</sub>が上昇しないケースがあり、それらは高湿度と対応していた。すなわち、雲過程によるSO<sub>2</sub>除去の過程が見られたことになり、雲物理学的な興味深い事象といえる。

一方、上記と一見矛盾する結果であるが、直江は富士山頂で2000年9月にエアロゾル粒子を静電式エアロゾルサンプラーで採取し、三宅島からの火山ガスと思われるエアロゾル粒子を得た。前述のように全体としての三宅島噴煙の富士山頂への輸送は決して多くないと推定されるが、2000年に入手した個々の粒子にはその影響が明らかなものも認められた。

それらを電子顕微鏡で観察し、エネルギー分散型特性X線分析を行い、エアロゾル粒子の組成と粒径分布を明らかにした。その結果これらの粒子は山頂南側の太平洋から気塊が運ばれてきており、半径0.06μmにピークを持つ粒径分布が得られた。これは自由対流圏で得られる粒径分布とは異なり火山ガス起源であると推察された<sup>19)</sup>。第3図に粒子の電子顕微鏡写真を示す。

2003年5月にシベリアで大規模な森林火災が発生したが、富士山頂でブラックカーボン (BC) 濃度を測定していた兼保は、5月21、24日および6月5～10日のBC測定データに大きなシグナルを検出している。OPC測定値にみられた小粒径粒子濃度の上昇や、エアロゾルの有機化合物組成などから、森林火災起源の物質が富士山頂まで到達し、捕集・計測されていたこ



第3図 富士山頂のエアロゾル粒子の電子顕微鏡写真と特性X線のピーク (Pt, Cuはサンプラーのメッシュの材質を示す)。図AおよびBは写真中のAおよびBの箇所での測定値を表す。

とがわかった。特に、5月22日の早朝には、100ppbvを越える高い濃度のO<sub>3</sub>を含む層がスモーク層本体(BCおよびCOが高濃度で含まれる)の上面に積み重なった二層の構造からなる物質輸送の状況が観測された。

2004年10月、ついに72年間の富士山頂有人気象観測に幕が下ろされた。それに伴って、オゾン計、SO<sub>2</sub>測定装置、ハイポリウムエアサンプラー、エサロメーター、Rnチャンバーなどの電源も切られ撤収された。

## 6. 2000年代アジアの大気汚染

2000年代になって、急速な経済発展を続けるアジア大陸の大気質に対する関心が高まってきた。そこで長距離汚染の監視におけるWMOベースラインステーションの中の高所山岳の役割が見直されている。WMO/GAWステーションとしてWaliguan山観測所(3810m)が設立され、またAtmospheric Brown Cloud(ABC)ピラミッド観測所(5079m)が、21世紀における最大の人口と産業活動が予想される中国とインドの国境付近に2000年に設立され、2006年から継続データを公開し始めた<sup>20)</sup>。台湾Lulin山頂(2862m)のLulin Baselineステーション(LBS)は2006年より連続観測を開始した<sup>21)</sup>。しかし黄砂に代表されるAsian dustを観測するには、このサイトの緯度は南に寄りすぎている。

これらの観測所と富士山とが提携できれば、東アジアを流れる空気塊の出口のデータが得られることによって汚染の予測にも貢献できるとして、各国研究者から寄せられる富士山大気化学観測再開への要望は大きい。

## 7. おわりに：2007年夏季の試み

2007年7月～8月、我々はNPO法人「富士山測候所を活用する会」として、気象庁から庁舎の一部を借用する形で、富士山測候所における各種研究を行い、その中で大気化学観測を再開した。オキシダント、エアロゾル、BCに関する速報値は兼保、加藤俊吾(首都大)らによりホームページ(<http://npofuji3776.net/>)に公開されているが、詳しいデータは今後報告される予定である。夏季2か月間だけではあるが、観測が再開できたことは一歩前進である。しかし、東アジアの観測ネットワークの中で一定の役割を果たすためには通年観測が必至であり、今後の充実が望まれ

る。

## 謝辞

富士山頂の化学観測に於いては、旧富士山測候所職員の多大な援助を受けた。心から感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Fuzzi, S. and D. Wagenbach ed., 1997: Cloud Multi-phase Processes and High Alpine Air and Snow Chemistry, Springer, 272pp.
- 2) Barrie, L. A., 2007: Proceedings of the third International Workshop on Mt. Fuji Project, 7.
- 3) Schnell, R., 2007: 平成18年度科学研究費補助金(基盤研究C)研究成果報告書, 16-22.
- 4) Nakazawa, T. *et al.*, 1984: J. Meteor. Soc. Japan, **62**, 688-695.
- 5) Koyama, T. and K. Sugawara, 1953: Bull. Chem. Soc. Japan, **26**, 123-126.
- 6) Dokiya, Y. *et al.*, 1991: Anal. Sci., **7**, Supplement Issue, 1001-1004.
- 7) 土器屋由紀子ほか, 1993: 天気, **40**, 39-42.
- 8) 丸田恵美子ほか, 1993: 環境科学会誌, **6**, 311-320.
- 9) 坪井一寛ほか, 1996: エアロゾル研究, **11**, 226-234.
- 10) Dokiya, Y. *et al.*, 1995: Water, Soil & Air Pollution, **85**, 1967-1972.
- 11) Sekino, H. *et al.*, 1997: エアロゾル研究, **12**, 311-319.
- 12) Tsutsumi, Y. *et al.*, 1994: Geophys. Res. Lett., **21**, 1727-1730.
- 13) Tsutsumi, Y. *et al.*, 1998: J. Geophys. Res., **103**, 16935-16951.
- 14) Hayashi, K. *et al.*, 2001: Water, Soil & Air Pollution, **130**, 1667-1672.
- 15) 土器屋由紀子ほか編著, 2001: 山の大气環境科学, 養賢堂, 185pp.
- 16) Dokiya, Y. *et al.*, 2001: Anal. Sci., **17**, i809-i812.
- 17) Igarashi, Y. *et al.*, 2004: J. Geophys. Res., **109**, D17304, doi10.1029/2003JD004428.
- 18) Igarashi, Y. *et al.*, 2006: Atmos. Environ., **40**, 7018-7033.
- 19) Naoe, H. *et al.*, 2003: Atmos. Environ., **37**, 3047-3055.
- 20) Laj, P., 2007: Proceedings of the third International Workshop on Mt. Fuji Project, 5.
- 21) Lin, N.-H., 2007: Proceedings of the third International Workshop on Mt. Fuji Project, 8.