

第15回成果報告会

2007年 - 2021年 富士山測候所で行った活動の成果

講演予稿集



主催：認定NPO法人富士山測候所を活用する会

後援：静岡県

日本たばこ産業株式会社

一般財団法人 WNI 気象文化創造センター

公益信託 大成建設自然・歴史環境基金

一般財団法人 新技術振興渡辺記念会

第15回成果報告会

講演予稿集

2022年3月5日(日)

オンライン開催

主催：認定NPO法人富士山測候所を活用する会

後援：静岡県

日本たばこ産業株式会社

一般財団法人WNI気象文化創造センター

公益信託 大成建設自然・歴史環境基金

一般財団法人 新技術振興渡辺記念会

ご挨拶

ワクチン接種の広がりによって大きく削がれたと思われた新型コロナウイルスの勢いは、新たな株種へと引き継がれることで、未だ収束の見通しが立たない状況です。感染が広がり始めた2020年当初に、収束まで2、3年以上かかると耳にしたときは半信半疑でしたが、発生から1年半が過ぎ、ワクチン接種や新薬認可など収束への希望が、ようやく見え始めた現在では、妥当な予想だったのだと身をもって認識させられております。

この期間、社会の活動は大きく制約され、富士山測候所での夏期観測も、2020年度は断念せざるを得ない状況でした。しかし、今年度は新型コロナウイルスに対するワクチン接種が進み、徹底した体温測定管理、測候所内の人数制限、極寒の厳しい条件を覚悟した換気ダクトを通した空調の徹底管理のもと、山頂における研究活動が再開されました。皆様のご尽力に、この場をお借りして改めて御礼申し上げます。

顔を突き合わせて議論することの大切さを、改めて感じている昨今であります。Zoomでのリモート開催ではありますが、皆様の素晴らしい成果のご報告と、闊達なご議論を、どうぞ宜しくお願い致します。



第15回成果報告会 実行委員長
南齋 勉(静岡理科大学)

第15回成果報告会 要旨集

実行委員長：南齋 勉(静岡理科大学)
副実行委員長：村田 浩太郎(埼玉県環境科学国際センター)

13:00 - 13:05	開会宣言:南齋勉(成果報告会実行委員長)、開会挨拶:三浦和彦(理事長)
13:05 - 13:17	2021年度夏期観測総括 - 鴨川仁(専務理事・事務局長)

■13:17 - 14:15：第一部「大気を診る」(座長:南齋勉)

O-01	矢田茂久(東京都立大学)	富士山麓太郎坊でのCO, O ₃ , SO ₂ の通年観測
O-02	野村渉平(国立環境研究所)	富士山頂の大気中CO ₂ 濃度
O-03	和田龍一(帝京科学大学)	2021年富士山頂と富士山太郎坊における窒素酸化物の計測
O-04	米持真一 (埼玉県環境科学国際センター)	大陸から富士山頂に運ばれたPM ₁₀ の化学成分の特徴
O-05	大河内博(早稲田大学)	富士山頂で空飛ぶマイクロプラスチックをつかまえる

■14:15 - 14:25：休憩

■14:25 - 15:10：富士山測候所取材余話(座長:村田浩太郎)

S-01	特別講演①	本年度も多くのメディアで富士山測候所での研究活動を紹介していただきました。その中で、取材の経緯やその後の反響など、ここだけのお話を関係者に伺う予定です。
S-02	特別講演②	
S-03	特別講演③	
S-04	広報委員	Q&A、今後の出版等についてお知らせ

■15:10 - 15:15：小休止

■15:15 - 16:01：第二部「雲や塵を掴む」(座長:加藤俊吾)

O-06	王一澤(早稲田大学)	富士山で雲水化学を調べる:雲は大気環境を知るリマス紙
O-07	南齋勉(静岡理科大学)	富士山で雲を直接サンプリング:一滴ごとの分析から何が見えるのか?
O-08	三浦和彦(東京理科大学)	微粒子が気候を変える! - 富士山体を利用したエアロゾルの気候影響の研究 -
O-09	村田浩太郎 (埼玉県環境科学国際センター)	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

■16:01 - 16:11：休憩

■16:11 - 17:23：第三部「防災・すごい現象」(座長:和田龍一)

O-10	大河内博(早稲田大学)	富士山周辺で豪雨は増えている?:豪雨災害と大気汚染の気になる関係 ~2021年8月には「大気の川」が富士山に大雨をもたらした~
O-11	加藤俊吾(東京都立大学)	防災にむけた富士山での火山性ガスモニタリング
O-12	長尾年恭(東海大学)	太郎坊における全磁力測定とそのデータ評価
O-13	鴨川仁(静岡県立大学)	2021年8月18日、富士山頂で発生した上向き雷放電前の高エネルギー放射線について
O-14	鈴木智幸(静岡県立大学)	2021年8月30日、首都圏で発生したブルースターターと富士山からの観測
O-15	安本勝 (富士山環境研究センター)	富士山体を検出器にした2021年夏期の雷現象観測と今後の指針

17:23 - 17:30	閉会挨拶:加藤俊吾(学術科学委員会委員長)
---------------	-----------------------

富士山麓太郎坊での CO, O₃, SO₂ の通年観測

矢田茂久¹, 加藤俊吾¹, 中村まりあ¹, 辰巳紘奨¹
1. 東京都立大学

1. はじめに

富士山の麓にある太郎坊は高度 1290m にあり、富士山頂の 3776m、御殿場の 450m のちょうど中間程度に位置する。これまで富士山頂において近隣の都市などの影響を受けにくい自由対流圏の大気観測をおこなってきたが、観測できる期間は商用電源が利用できる夏季だけに限られていた。富士山中腹にある太郎坊が自由対流圏に位置しているのであるなら、夏季に限らず商用電源を利用できるため、通年での自由対流圏の観測が実現できることになる。また、富士山体に沿って地表の空気が下降・上昇する(山風・谷風)ことがどの程度おこっており、大気微量成分に影響を知るために、太郎坊での測定は有力な情報を与えてくれる。そのため、2020 年夏季より太郎坊においてオゾン(O₃)、一酸化炭素(CO)、二酸化硫黄(SO₂)の観測を行うことにした。

2. 観測方法

2020 年 8 月より太郎坊における CO, O₃, SO₂ の連続測定を開始した。CO, O₃, SO₂ はそれぞれ赤外吸収法(thermo model 48C TEL)、紫外吸収法(thermo model 49C)、紫外蛍光法(thermo model 43C)を用いて測定を行った。温度や水蒸気などによるベースラインの変動を補正するため、CO, SO₂ は毎時 0-15 分にゼロガスを測定し、毎時 16-59 分に測定した外気とのシグナル差により濃度を決定した。

3. 濃度変化

図 1 には SO₂, CO, O₃ それぞれの観測結果を示した。CO は濃度上昇がときどき観測されるが通年を通して比較的安定したデータが得られた。O₃ は日内変動を繰り返しながら変化し、SO₂ ではスパイク的な濃度上昇が観測された。CO と O₃ は相関がみられたが、SO₂ では CO, O₃ と相関を示さな

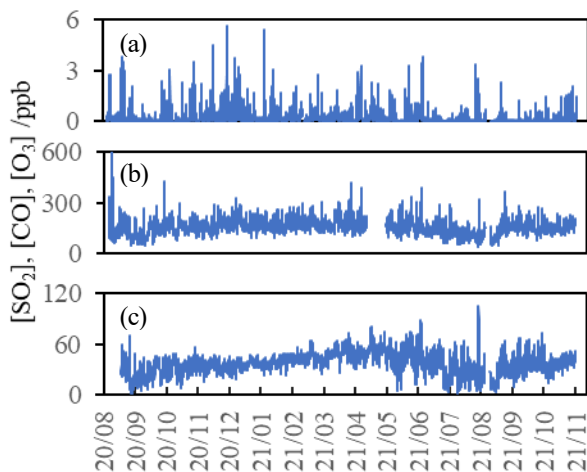


図 1 (a)SO₂, (b)CO, (c)O₃ の観測結果(1 時間値)

い濃度上昇がいくつか観測された。人為起源による SO₂ 濃度上昇では CO などの他の大気汚染物質との相関みられることから、火山ガスなどの自然発生源による影響が観測されたと推測される。

4. 平均日内変動

太郎坊では昼間に比較的高濃度、夜間に低濃度となる平均日内変動が CO, O₃, SO₂ のそれぞれで観測された。図 2 には SO₂ の平均日内変動を示した。夜間では比較的安定したデータが得られた。昼夜による濃度変化は山谷風などの影響による大気境界層の変動によるものと推測される。オゾンは日中の太陽光により生成するため、昼間に高濃度となる傾向がみられる。夜間のデータのみを用いたデータでは関東近傍におけるバックグラウンド濃度が測定できることが示唆された。

5. バックワードトラジェクトリー解析

NOAA の HYSPLIT Trajectory Model を用いて、Backward trajectory 解析を行った。風向を太平洋(P)、東南アジア(SE)、北(N)、北西(NW)、中国(上海)(C)、韓国+北京(CK)の 6 つに分類したときの CO 濃度を図 3 に示した。バックグラウンド濃度における空気塊起源の影響評価のために夜間(20, 22, 0, 2, 4 時)のデータのみを用いて分類を行った。太平洋起源や東南アジア起源などの海洋性由来の大気では大陸由来に比べて濃度が低い傾向がみられた。CO 濃度の季節変動および空気塊起源の季節による頻度の違いも反映してしまうため、より細かい分類が必要とされる。O₃ でも同様の空気塊起源による違いがみられ、夜間のみのデータを用いることで、越境大気汚染の影響がみられた。

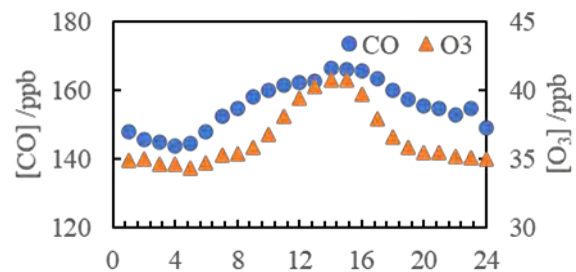


図 2 平均日内変動(CO, O₃)

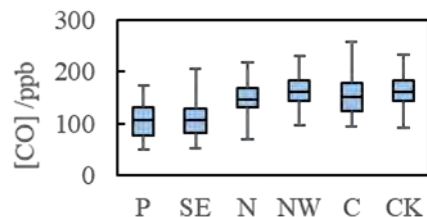


図 3 空気塊起源別 CO 濃度の比較

富士山頂の大気中 CO₂濃度

野村渉平, 寺尾有希夫, 向井人史
国立環境研究所

1. はじめに

国立環境研究所は、富士山頂での CO₂濃度観測を目的に、1年の大半で商用電力の供給がない環境においても通年で高精度に CO₂濃度測定が可能なバッテリー電源により稼働する省電力型の CO₂濃度観測システムを開発した。それを 2009 年に富士山測候所に設置し、富士山頂の CO₂濃度観測を開始した。本報では、これまでに得られた観測結果を報告する。

2. 結果

2-1. 2020-2021 年の観測成功

2020 年夏期の富士山頂への登山道は、COVID-19 の感染拡大防止対策により閉鎖された。その影響により 2020 年夏期にバッテリーへの充電が実施しなかった。そのため 2020 年 7 月から 2021 年 7 月までの期間は、2019 年 7 月に充電されたバッテリーで観測を継続せざるを得ない事態となった。バッテリーの電圧は幸いなことに 2021 年 7 月まで CO₂濃度観測システムの停止が起こる下限値である 10.4V 未満まで低下しなかった(図 1)。すなわち富士山頂での大気中 CO₂濃度観測は、コロナ禍でも途切れることなく継続できた。

2-2. 新たな CO₂濃度検出部の導入

更なる省電力化を図るために新たな CO₂濃度検出部を開発し、それを CO₂濃度観測システムに導入した(写真 1)。しかし新 CO₂濃度検出部を導入後、衛星通信を介して研究所のサーバーに測定結果を送信する通信成功率が著しく低下した。その対応として、通信用ケーブルの径を太いものに置き換えたが、通信成功率に変化はなかった。来年度は通信アンテナの位置の変更等を実施し、通信成功率の回復を図る。

2-3. CO₂濃度

季節変動成分を取り除いた長期トレンドでの 2021 年 7 月の月平均 CO₂濃度は 4182 ppm であり(図 2(a))、前年同月と比較すると 24 ppm 高い濃度であった。COVID-19 の感染拡大防止を目的としたロックダウン政策の影響による人為起源の CO₂排出の停滞は一時的であり、最終的には 2020 年に起こったパ

ンデミックは CO₂濃度の増加速度に大きな影響を与えることはなかった。例年の CO₂濃度増加率が維持されれば来年同月には 420 ppm を上回ると予想される。更にパリ協定で一つの目安となっている 1.5°C 上昇の条件である大気中 CO₂濃度 430 ppm 到達は 2030 年以前に訪れる可能性が見えてきた。

2020 年以降ラニーニャ現象が強まっているため、北半球の代表的なマウナロア観測所の CO₂濃度増加率は低下傾向にあるが、富士山頂の CO₂濃度増加率は低下する傾向が見られない。今後も富士山頂の CO₂濃度の観測を継続し、富士山頂の CO₂濃度増加率の周期性とエルニーニョ/ラニーニャ現象との関係性を見ていく。

2-4. コロナ禍での CO₂濃度

COVID-19 の感染拡大防止を目的に 2020 年 1 月から 3 月を中心に中国大陸でロックダウンが実施された。同時期の富士山頂の CO₂濃度の季節成分が過去(2010-2019 年)に見られた CO₂濃度の季節成分の変動と異なった(図 3(a))。更に同期間の富士山頂の CO₂濃度とマウナロア観測所の CO₂濃度の差(Δ CO₂)の推移は、モデルで算出された中国の人為起源の CO₂排出量の変化量の推移とほぼ一致していた(図 3(b))。これらの結果から、富士山頂とマウナロア観測所の CO₂濃度の差(Δ CO₂)は、中国から排出される CO₂量を即時的に捉えられる指標になりえることが示唆された。

2021 年 14 月の富士山頂の CO₂濃度の季節成分は、2020 年の時に見せた特異的な推移ではなく例年に近いものであった(図 3(a))。このことから 2020 年 1-3 月に富士山頂で観測された CO₂濃度の大きな変動は、中国で実施されたロックダウンによる人為起源の CO₂排出量の低下を反映したものと考えられた。

3. おわりに

今後、マウナロア観測所の 2021 年の CO₂濃度を含めた解析を行い、富士山頂で実施されている大気中 CO₂濃度観測の有効性を検証していきたい。

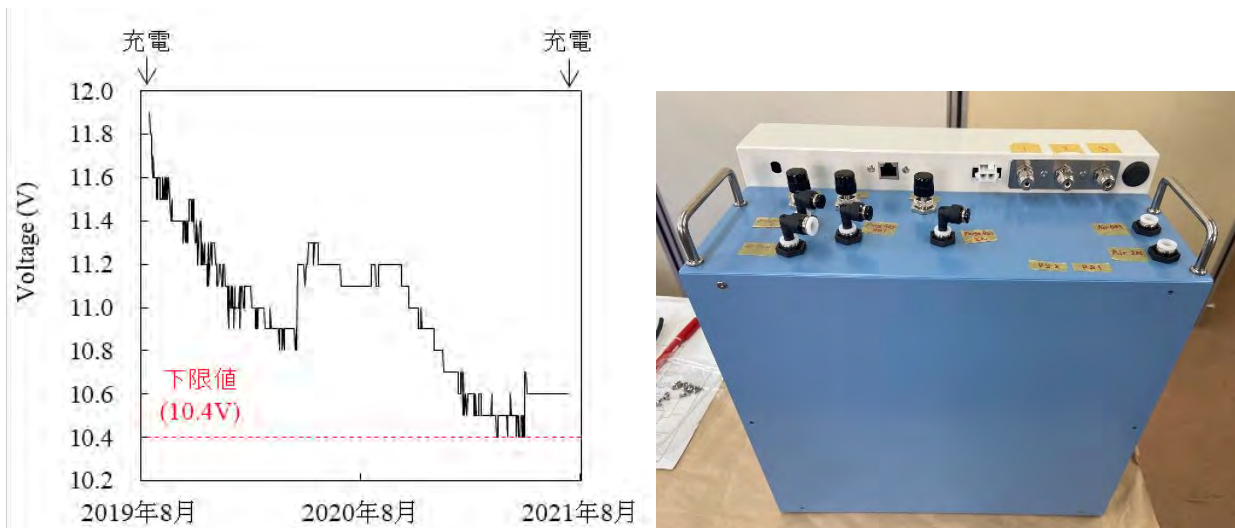


図1. 2019-2021年のCO₂濃度観測システムのバッテリー電圧値, 写真1. 2021年に導入した新たなCO₂濃度検出部

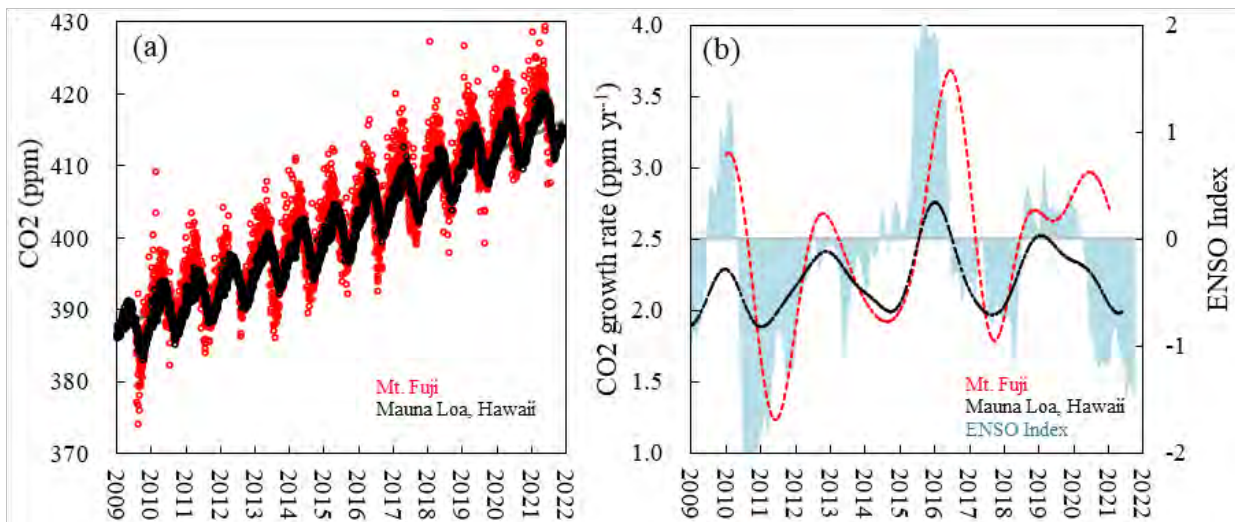


図2. 富士山頂とマウナロア観測所の(a)大気中CO₂濃度と(b)CO₂濃度増加率とENSO Index

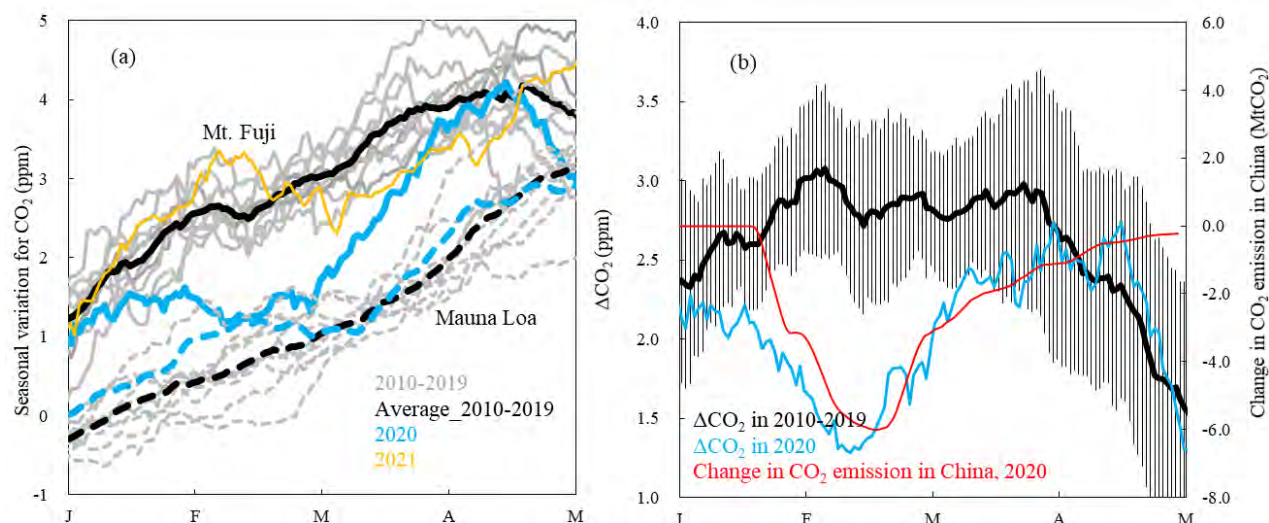


図3. (a) 2010-2021年の1-4月の富士山頂(実線)とマウナロア観測所(破線)のCO₂濃度の季節変動と(b)富士山頂のCO₂濃度からマウナロア観測所のCO₂濃度を引いた値(Δ CO₂)と2020年の中国のCO₂排出量の変化量

2021 年富士山頂と富士山太郎坊における窒素酸化物の計測

和田龍一¹, 佐藤颯人¹, 定永靖宗², 加藤俊吾³, 大河内博⁴, 三浦和彦^{5,12}, 小林拓⁶, 皆巳幸也⁷, 鴨川仁⁸
松本淳⁴, 米村正一郎⁹, 松見豊¹⁰, 梶野瑞王¹¹, 速水洋⁴, 土器屋由紀子¹², 畠山史郎¹³

1.帝京科学大, 2.大阪府立大, 3.東京都立大, 4.早稲田大, 5.東京理科大, 6.山梨大, 7.石川県立大, 8.静岡県立大
9.県立広島大 10.名古屋大, 11.気象研, 12.富士山環境研究セ 13.アジア大気汚染研究セ

1. はじめに

富士山は独立峰であり, その山頂は自由対流圏に位置することから, 大陸からの越境汚染を調査するのに適した場所である. 大気汚染物質として重要な窒素酸化物に関して, 2014 年に一酸化窒素(NO)と二酸化窒素(NO₂), 2015 年と2016 年に総反応性窒素酸化物(NO_x), 2017 年には越境汚染の指標として重要な NO_x 酸化物質(NO_z)の計測を行った. しかしながら大型の分析装置を用いた観測は, 電力の供給される夏季のみに限られ, 冬季を含めた通年の観測は難しかった.

2020 年 8 月より富士山南東麓の標高 1300m に位置する富士山太郎坊(以下太郎坊)にて窒素酸化物の連続観測を開始した. 太郎坊には年間にわたって電力が供給されていることから窒素酸化物の通年観測が可能である. そのためもし太郎坊で大陸からの越境汚染を観測出来れば, 通年にわたってその影響を調べることが可能となる. しかしながら太郎坊は平地に比べれば標高は高いものの, 富士山頂(以下山頂)に比べてその標高は低いことから地上からの影響を受けると考えられ, 大陸からの越境汚染を観測できるかどうかは不明であった.

そこで2021 年度の夏季観測において山頂と太郎坊における窒素酸化物の同時観測を実施し, 太郎坊にて大陸からの越境汚染を観測できるかどうか検討した.

2. 方法

山頂にて, 2021 年 8 月 3 日より NO, NO₂, NO_y 濃度の計測を行った. NO_y 濃度の計測は, 市販の Mo コンバータ化学発光分析装置(Thermo Fisher Scientific, model 42S)を改良して用いた. 装置の校正は, NO 標準ガスとゼロガス発生装置を用いて, 山頂にて行った. NO と NO₂ 濃度の計測は開発した光分解コンバータに大気試料を通し, LED 光(375nm)を 5 分毎に ON/OFF することで計測した. NO₂ の光分解効率を, NO₂ 標準ガスを山頂にて測定することで求め, NO₂ 計測値の補正に用いた.

太郎坊において山頂と同様の分析装置を用いて 2020 年 8 月より継続して計測を行っている. 今回山頂で測定した期間の観測結果を用いて解析を実施した.

3. 結果と考察

山頂および太郎坊の NO, NO₂, NO_y および NO_z 濃度の

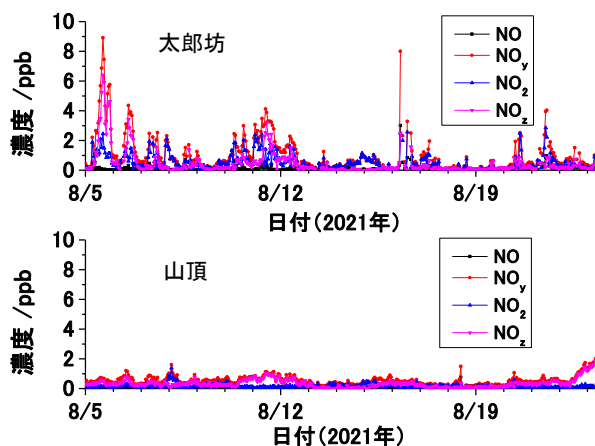


図 1. 2021 年富士山頂と富士山太郎坊における窒素酸化物濃度. 上) 富士山太郎坊. 下) 富士山頂.

2021 年 8 月 5 日から 8 月 24 日までの観測結果を図 1 に示す. 山頂の NO, NO₂, NO_y, NO_z の平均濃度はそれぞれ 0.03±0.06 ppb, 0.15±0.13 ppb, 0.63±0.48 ppb, 0.45±0.49 ppb (±の後の数字は標準偏差)であった. 一方太郎坊の平均濃度はそれぞれ 0.10±0.19 ppb, 0.51±0.57 ppb, 1.05±1.21 ppb, 0.44±0.79 ppb であった. NO, NO₂, NO_y の平均濃度は太郎坊のほうが高いが, NO_z の平均濃度は山頂と太郎坊で同程度であった. 2021 年は海洋からの気塊が多かったことが後方流跡線解析から推定され, 例年に比べて山頂の窒素酸化物の濃度が低かったと考えられた.

8 月 23 日から 24 日の山頂にて濃度が高くなっている期間は後方流跡線解析より大陸からの気塊が山頂, 太郎坊に到達していたことが示唆された. この期間のオゾン濃度(東京都立大学データ)と NO_z 濃度の相関を調べた. 相関プロットの傾きはその気塊のオゾン生成効率を示す. 山頂と太郎坊にて同時期に観測された気塊のオゾン生成効率はそれぞれ 12.2 と 11.5 であり, 到達時間に差があったものの同一の起源をもった気塊である可能性が考えられた. 太郎坊においても大陸から輸送された気塊を捉えられることができ, 越境汚染を評価できる可能性があることが分かった. 一方 8 月 6 日から 9 日に観測された気塊は, 後方流跡線解析よりともに海洋由来のきれいな気塊と推定されたものの, 山頂の NO_y 濃度は 0.5ppb 程度と低かったのに対し太郎坊では最大 9ppb と高い値を示した. 太郎坊では表層の影響を受けたと考えられる. 今後データを積み重ね, 検討を行う.

大陸から富士山頂に運ばれた PM₁ の化学成分の特徴

米持真一¹, 村田浩太郎¹, 市川有二郎¹, 大河内博³, 畠山史郎^{1,2}, Ki-Ho LEE⁴

1. 埼玉県環境科学国際センター, 2. アジア大気汚染研究センター, 3. 早稲田大学, 4. 韓国済州大

1. はじめに

我が国の PM_{2.5} 濃度は低下傾向が続いており, 多くの地点で環境基準を下回るようになった. 一方, WHO は 2021 年にこれまでの大気質ガイドラインを, これまでの 10 μg/m³(年平均値)から 5 μg/m³に引き下げた. この濃度はバックグラウンドレベルに近く, 一層の濃度低下が求められる.

大気エアロゾルは, 粒径 2 μm 前後を境に粗大粒子と微小粒子に大別されるが, 粒径 2.5 μm 以下の粒子状物質として定義される PM_{2.5} には粗大粒子の一部も含まれ, 人為起源の粒子の評価には PM₁ が適していると考えられる(図 1).

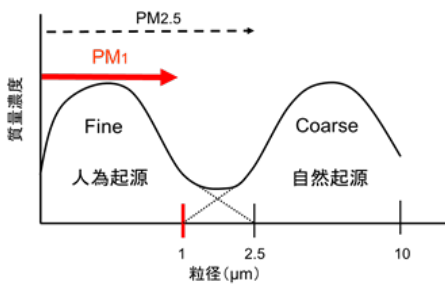


図 1 大気エアロゾルの粒径と起源

我々はこれまで富士山頂で PM_{2.5} 採取を行ってきたが, 日中に富士山登山道などから舞い上がった表層粒子の影響を強く受

けることから, 2018 年から PM₁ の採取を行い, 2019 年には昼夜別の採取を行っている. 2020 年度に山頂観測ができなかったことから, 2021 年は引き続き昼夜別の PM₁ 採取を行うこととした.

2. 方法

旧富士山測候所 1 号庁舎に設置した PM_{2.5} サンプラー (2025i) の分級器を PM₁ Sharp cut cyclone に換えて PM₁ を採取した. 期間は 2021 年 7 月 30 日~8 月 15 日の 17 日間である. PTFE フィルター (Teflo, Pall) を用いて, 6 時と 18 時にフィルター交換を行い, 6 時~18 時を日中, 18 時~翌朝 6 時を夜間とした. フィルターの 1/2 を用いて水溶性無機イオン (IC 法), 残りを用いて無機元素(マイクロウェーブ酸分解-ICP/MS 法) の分析を行った.

3. 結果と考察

図 2 に期間中の PM₁ 濃度を示した. 平均濃度は 1.9 ± 1.2 μg/m³ であり, 2019 年の 2.7 μg/m³ と比べて大幅に低い濃度であった. 日中と夜間の比較では, 日中が 1.8 μg/m³, 夜間が 2.0 μg/m³ であり, PM_{2.5} も含めて昼夜別採取を行った 3 年間では初めて夜間の方が高い濃度となった.

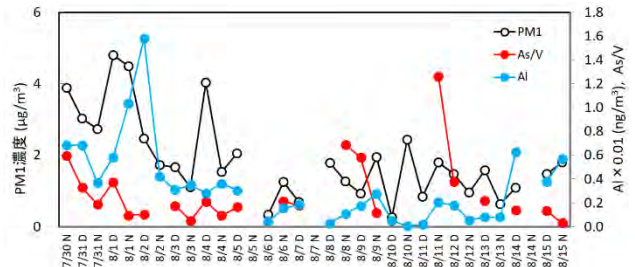


図 2 PM₁, Al 濃度と As/V 比の変化

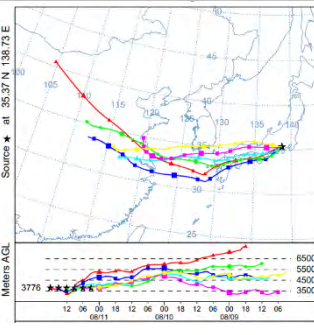


図 3 8/11 夜間の後方流跡線

観測期間中の 8 月 7 日から 11 日にかけて日本列島は台風 10 号の影響を受け, その後は前線が停滞したことで, 連日雨天となった. 図 2 に Al (アルミニウム) 濃度および As (ヒ素) / V (バナジウム) 比についても示す.

Al は土壌粒子等の指標

元素であるが, PM₁ や Al 濃度は 8 月 5 日前後を境に濃度レベルが一段低くなっており, 降雨等により表層粒子の舞い上がりが抑制されたことを示唆していた.

大陸から空気塊が輸送された際, As/V 比が夜間に高まることを報告してきた^{1,2)}. 2021 年は 8 月 11 日の夜間に 1.3 に上昇したが, この日以外に明瞭な上昇は見られなかった. 後方流跡線解析の結果, 大陸方面から直接気塊が運ばれたことを示唆しており(図 3), 本手法の妥当性が示された.

4. おわりに

2021 年は試料採取を行った期間は台風や前線の停滞により雨天の日が続き, 例年とは異なる気象状況であった. これに伴い PM₁ 濃度や無機元素濃度は低濃度となり, 検出下限値を下回る事例が多く見られた. 今後, 有効な分析データを多く得るために手法の検討が必要かもしれない.

参考文献

- 1) 米持真一ほか: 富士山頂における昼夜別に採取した PM_{2.5} 中の無機元素による発生源解明, **70**, 363-371 (2021).
- 2) 米持真一ほか: 富士山頂における PM₁ 中無機元素の昼夜別変動, 第 13 回成果報告会講演予稿集, O-11 (2020).

富士山頂で空飛ぶマイクロプラスチックをつかまえる

大河内博¹, 吉田昇永¹, 谷悠人¹, 速水洋¹, 新居田恭弘², 勝見尚也³, 皆巳幸也³, 竹内政樹⁴, 加藤俊吾⁵, 和田龍一⁶, 三浦和彦⁷, 藤井佑介⁸, 竹中規訓⁸, 反町篤行⁹, 梶野瑞王¹⁰, 足立光司¹⁰, 石原康宏¹¹, 岩本洋子¹¹

1.早稲田大学, 2.パーキンエルマー・ジャパン, 3.石川県立大学, 4.徳島大学, 5. 東京都立大学, 6.帝京科学大学, 7. 富士山環境研究センター, 8.大阪府立大学, 9. 福島県立医科大学, 10.気象研究所, 11.広島大学

1. 地球表面を巡るマイクロプラスチック.

年間 480 万トンから 1280 万トンのプラスチックゴミが、陸から河川を通じて海洋に流れ込んでいます(2010年推計). プラスチックゴミは輸送過程や海洋で破砕されて微細化します. 直径 5 mm 以下のプラスチック小片はマイクロプラスチック (microplastics: MPs) と呼ばれています. マイクロカプセルやマイクロビーズのように, 最初から 5 mm 以下の MPs もあります(一次 MPs). 破砕されて 5 mm 以下となったものは二次 MPs と呼んでいます. 漁網などの大きなプラスチックゴミは海洋生物に巻きつき, MPs は魚や海鳥が誤食することにより命を奪っています. 海洋生態系の破壊が懸念されています.

これまでプラスチックごみの終着点は海洋と考えられてきましたが, MPs が海洋から大気へ放出され, 陸域へ年間 14 万トン輸送されていることが分かってきました(図 1). すなわち, プラスチックゴミの終着点は海洋ではなく, MPs となって海洋から大気を通じて地球表面を循環しています. 陸域から大気を通じて海洋にも輸送されていることが報告されています.

2. 大気中マイクロプラスチックとは?

大気中マイクロプラスチック (Airborne microplastics; AMPs) の存在は, 2016 年に初めて確認されました. フランス・パリで捕集された大気沈着物から繊維状マイクロプラスチックが多数発見され, 中国・広東省で同様の報告がありました. 2019 年にはフランス・ピレネー山脈で都市部と同程度の AMPs が降っていることが報道され, 日本国内でも注目されました. その後, 北極やスイス・アルプスの雪氷から MPs が発見され, 2020 年には米国西部でも AMPs が地上に降っていることが報告され, 「プラスチックの雨が降る」と報道されました.

2016 年から 2021 年までに報告された論文をまとめると, 大気中に浮遊している AMPs 個数濃度は 0.01 (大西洋西部) ~ 5650 (中国・北京) 個/m³ です. 都市部が高く, 外洋で低い傾向にあります. ただし, 採取法, 前処理法, 分析法が同じではないので単純に比較ができません. 中国では同一手法を用いて観測を行い, 北部 3 都市平均で 358 個/m³, 南部 3 都市平均で 230 個/m³であることを報告しています.

以上のように, AMPs は都市部, 山間部, 外洋, 北極で確認されていますが, 地上部での観測であり, 自由対流圏と呼ばれる高度 2500 m を越える上空に浮遊している AMPs の存在は確認されていません. そこで, 私達は 2019 年から富士山頂で PM_{2.5} を捕集して AMPs の実態解明に取り組んでいます.



図 1 地球表面を巡るマイクロプラスチック

3. 大気中マイクロプラスチックは何が問題か?

3.1 健康リスク

MPs の体内摂取経路として食物, 飲物, 空気があります. どのくらいの MPs を, どのような経路で摂取しているのか詳細は分かっていませんが, 三つのモデル研究をご紹介します.

一つ目は WWF (世界自然保護基金) による推計です. ヒトは一週間にクレジットカード一枚分 (5 g) の MPs を摂取しているそうです. 二つ目は米国における推計です. 食物と空気が同程度であり, 合計で年間 7 万個 ~ 12 万個, 水道水から年間 4 千個, ペットボトル水から年間 9 万個の MPs を摂取しているそうです. 三つ目は, 一日あたり子供で 553 個 (184 ng), 大人で 884 個 (583 ng) と推計しています. 一週間摂取量は大人で 4 mg, 子供で 1.3 mg であり, WWF 推計値の 1/1000 以下です. 年間摂取量は子供で 20 万個, 大人で 32 万個になり, 米国推計値よりも多くなります. WWF では空気吸入を無視していますが, ほかに二つでは空気吸入が最も重要な経路です.

私たちは本当に MPs を空気から吸っているのでしょうか? 答えはイエスです. 実際に呼吸系疾患のある患者の痰から 20 ~ 500 μm の MPs が見つかっています. 喫煙者では非喫煙者より多くの MPs が検出されています. この大きさの AMPs は, うがいや鼻洗いで除去できます. 一方, 吸入性粒子と呼ばれる 4 μm (空気動力学径: 単位密度の球の直径に換算した粒径) 以下の粒子では肺まで入り込みます. 実際に呼吸系疾患で亡くなった方の肺胞から MPs が見つかっています. 粒状で 1.60 ~ 5.56 μm, 繊維状で 8.12 ~ 16.8 μm であり, 粒状が 90% を占めていました. 材質はポリプロピレンとポリエチレンで全体の約 6 割を占めていました. また, 摂取経路は分かっ

ていませんが、妊娠女性の母胎と胎児からもMPsが検出され、ヒト糞便からMPsが見つかっています。体内に取り込まれたMPsが体内のどこに、どのくらい蓄積されるのか、健康にどのような影響を及ぼしているのか分かっていません。

3.2 環境リスク

MPsは紫外線による劣化過程でメタンなどの温室効果ガスを放出することが分かっています。メタン放出速度は水中よりも空气中が数十倍も大きいようです。上空ほど紫外線が強いので、自由対流圏のAMPsから温室効果ガスが放出されるかもしれません(図2)。AMPsが太陽光を吸収・散乱して、地球の温暖化や冷却化に関与する可能性も指摘されています。

プラスチックは水をはじきますが、劣化したり、表面に大気汚染物質が付着すると雲を作りやすくなります。大気中にも微生物が浮遊していることは知られていますが、AMPsに微生物が棲みついて表面にバイオフィーム形成すると雲を作りやすくなります。海洋プラスチックゴミ表面には微生物が棲みついて“プラスチック生命圏”という独自の生態系を構築しています。陸域では農地、森林、最終処分場、不法投棄場などでMPsに微生物が棲みつき、風で巻き上げられると、微生物が棲息するAMPsになるかもしれません。AMPsが雲形成に関与してれば、降雨量を変化させ、太陽光の吸収や散乱に影響を及ぼして気候変動に関与します。

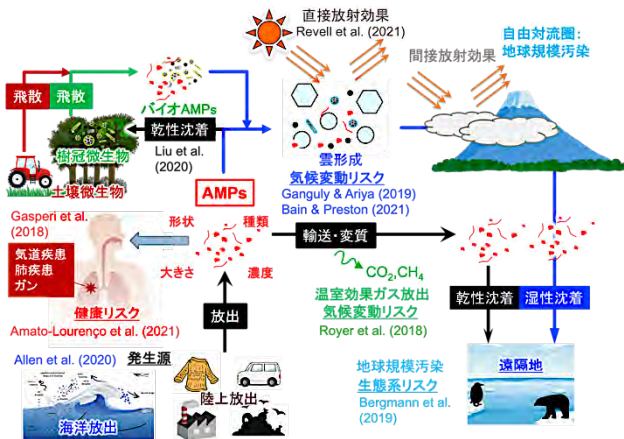


図2 大気中マイクロプラスチックの環境および健康リスク

4. 富士山頂で採取したPM_{2.5}からAMPsを検出！

図3には、2021年7月20日から22日の夜間(18:00-4:00)に採取したPM_{2.5}から検出されたAMPsの一例を示します。綺麗な球状のアクリル樹脂マイクロビーズです。塗料添加剤など幅広く使われていますが、市販品に比べると小さいので環境で削られて小さくなったものと考えられます。

図4には、AMPsの個数濃度と組成を採取期間中の空気由来とともに示しています。太平洋上空の空気が流入した

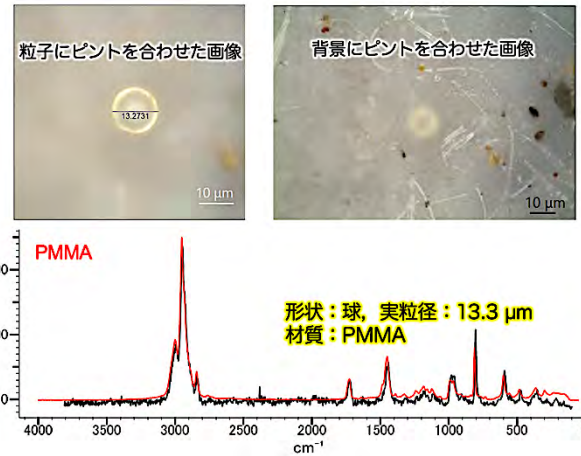


図3 富士山頂で採取したPM_{2.5}から検出された球状アクリル樹脂粒子(日本分光社製ラマン分光装置で計測)

2021年7月20日から22日に0.06個/m³であり、既往研究の外洋大気と同程度でした。材質はポリプロピレン(PP)とポリエチレンテレフタレート(PET)でした。大陸上空から空気が流入した7月22日から26日夜間にPPが増加し、ポリスチレン(PP)も検出されました。東南アジアの地上空気が流入した7月26日から8月3日、8月3日から10日夜間に濃度がさらに増加し、プラスチックの種類が増え、エチレンプロピレンゴム(EPDM)、アクリロニトリルブタジエンスチレン共重合体(ABS)、ポリカーボネート(PC)、生分解性プラスチック(GP)であるポリビニルアルコール(PVA)も検出されました。本研究により自由対流圏大気中AMPsの一端が明らかになりました。

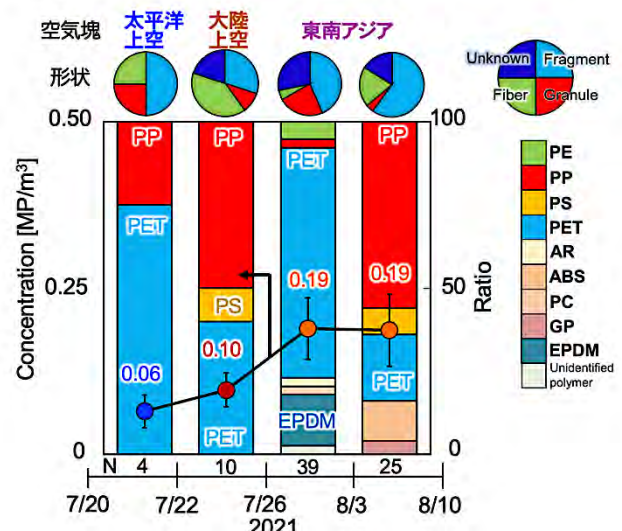


図4 富士山頂におけるPM_{2.5}中AMPsの個数濃度と組成

5. 謝辞

この研究は、令和3年より環境研究総合推進費「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響」(JPMEERF20215003)により行われました。現在、富士山頂を含めて日本全国でAMPsの実態解明を行っています。

富士山で雲水化学を調べる:雲は大気環境を知るリトマス紙

王一澤¹, 大河内博¹, 遠藤美由¹, 皆巳幸也², 三浦和彦³, 戸田敬⁴, 竹内政樹⁵, 加藤俊吾⁶, 和田龍一⁷

1.早稲田大学, 2.石川県立大学, 3.東京理科大学, 4.熊本大学, 5.徳島大学, 6.東京都立大学, 7.帝京科学大学

1. はじめに

雲は液滴が小さいので重力による落下速度が小さく、空気中に長時間にわたって浮遊しています。そのため、大気汚染物質との接触時間が長くなります。また、ガス状の大気汚染物質は小さい液滴ほど接近しやすく、小さい液滴ほど単位体積当たりの表面積(球の半径を r とすると、 $4\pi r^2/(4/3\pi r^3) = 3/r$)が大きいため大気汚染物質との接触面積が大きくなり、大気汚染物質を取り込みやすくなります。小さい液滴は体積も小さいので、同じ量の大気汚染物質を取り込むと大きな液滴より高濃度になります。雲粒は雨粒に比べて小さいので pH が低く、イオン強度(主要無機イオン濃度)も高くなります(表 1)。雲粒に大気汚染物質が溶け込むと雲粒の成長を促したり、あるいは、抑制したりします。雲粒径分布の変化は太陽光の反射率に影響を及ぼし、降雨量分布を変化させるので地球環境に影響を及ぼします。雲は地球表面の約6割を占めるため、その影響は計り知れません。

雲は高度が高いところに浮遊しているので採取が難しく、化学研究は世界的にも遅れています。1990年代まで森林立ち枯れの要因として酸性霧が注目され、大部分は高度 2000 m までの森林域で観測されており、自由対流圏高度での雲水化学研究は限られています²⁾。高所での雲観測は2つ手段があります。一つは航空機^{3,4)}、もう一つは山体^{5,6)}を用いたものです。しかし、航空機観測は費用が高額であり、気象条件の制約があります。山体観測は山体の影響を受ける可能性はあるものの常時観測ができます。

富士山は日本列島の中央部に位置しており、日本の最高峰であり、日本国内の地上大気汚染の影響を受けにくく、山頂は自由対流圏高度に位置しています。観測地点の地形は孤立峰(標高 3776m)であり、裾野の広がりによって標高が高いことから山体の影響を受けにくいのです。また、標高 2500m 以上は森林限界にあり、植生の影響も受けにくいことから、自然的な巨大観測タワーとして自由対流圏大気観測に適しています。ここでは、富士山山頂で私たちが行ってきた雲水化学の長期観測結果をご紹介します。

表1 大気水滴の特徴(Seinfeld, 1986. Table 5.8 一部修正)¹⁾

	半径 μm	大気中水分量 m ³ m ⁻³	pH	イオン強度
靄	0.03~0.3	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻¹⁰	1~8	約1
雲	10	5×10 ⁻⁸ ~3×10 ⁻⁶	3~6	10 ⁻³ ~10 ⁻²
霧	10	2×10 ⁻⁸ ~5×10 ⁻⁷	2~6	10 ⁻³ ~10 ⁻²
雨	200~2000	-	4~5	10 ⁻⁴

2. 雲は大気環境を知るリトマス紙:pH の変化を知る

図1の1段目に雲水の pH と N/S 比(硝酸イオン当量濃度と非海塩性硫酸イオン濃度の比)、2段目に主要無機イオン総濃度と化学組成の割合を示しています。2020年には、新型コロナウイルス感染拡大のため、富士山頂での研究活動はできませんでした。

雲水 pH と N/S 比はばらつきがあるものの、2006年から経年的に上昇傾向にあります。過去には pH 3 を下回る強酸性でしたが、近年は pH 5 付近まで回復してきています。N/S 比が上昇していますので、硫酸濃度減少が pH の回復の要因であるといえます。

主要無機イオンは、2007年、2008年には試料数が少なく高濃度ですが、10試料以上採取できた2009年以降は低濃度を推移しており、2021年には最低濃度を示しました(0.048 μeq/L)。化学組成をみると、硫酸イオンの割合が減少しています。これは N/S 比の増加と一致しています。

新型コロナウイルス感染拡大に伴うロックダウン前の2019年までに比べて、2021年には pH、N/S 比ともに上昇し、過去最大値を示しました(pH:5.25, N/S 比:1.34)。

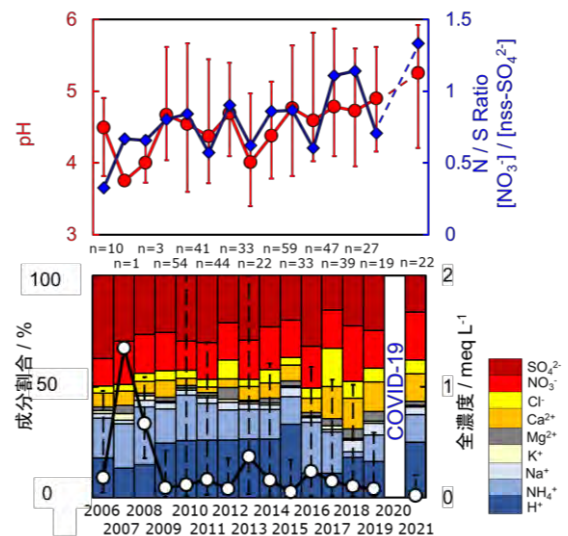


図1. 夏季富士山山頂における雲水 pH と N/S 比, 総主要無機イオン濃度の経年変化

3. 富士山頂の雲水 pH に及ぼす越境汚染の影響

富士山頂には色々な空気が運ばれてきます。どこから空気が運ばれてくるのかはアメリカ海洋大気局 NOAA が開発した HYSPLIT model で調べることができます。富士山頂の空気の履歴を、図2のように、大陸北部(赤色)、大陸南部(橙

色), 海洋(水色)に分類しました。分類が難しいものは「その他」にしました。図 2 には平均 pH も一緒に示しています。2009 年以降, 2013 年に最低 pH を示しましたが(pH 4.01), このときには大陸南部から運ばれて空気が半分を占めていました。主要無機イオンも最高濃度でした。一方, 海洋から運ばれてくる空気が多かった 2019 年, 2021 年には雲水 pH が高く, 2021 年には最高 pH 5.25 を示しました。このように, 雲水 pH は運ばれた空気の履歴を反映しています。



図 2. 富士山頂汚染物質の由来と pH 変化

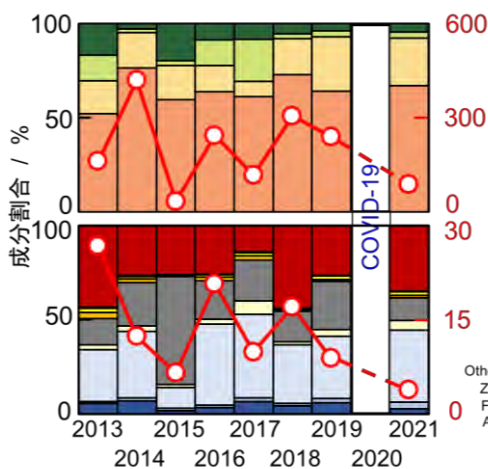


図 3. 富士山頂における雲水中微量金属元素の経年変化

4. 富士山頂の雲水中微量金属の長期間変動

雲水には有害な重金属も含まれています。図 3 に, 2013 年から 2021 年における雲水中微量金属元素の経年変化を示します。1 段目に溶解微量金属元素の総濃度平均と組成, 2 段目に溶解態微量金属元素の副成分(Al, Fe, Zn 以外の 10 元素)の総濃度平均と組成割合を示します。微量金属元素の主成分は Al, Fe, Zn であり, 副成分では Mn, Cu, Pb の割合が高いです。ばらつきは大きいですが, 有害重金属を含む副成分は減少傾向にあります。2021 年と 2013 年

を比較すると, 2021 年には総濃度, 副成分濃度ともに減少し, 副成分濃度は 2013 年以降最低でした。2021 年には 2019 年と比較して全金属元素濃度が減少しており, 特に減少率が高かったのが V(-80%), Cu(-80%), Fe(-68%)でした。石炭燃焼由来で越境汚染の指標ともなっている As(-32%), Se(-61%), Cd(-19%)も大きく減少していることが分かりました。これは, アジア大陸の発生源の汚染物質排出量の減少と, 海洋由来の空気の増加が原因と考えられます。

5. おわりに

夏季富士山頂における雲水化学の長期観測により, 越境大気汚染の影響は減少し, 日本上空の空気質は改善傾向にあることが分かってきました。今後も引き続き, 監視が必要です。

参考文献

- 1) Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics. Second edition. Wiley-Interscience, 1203.
- 2) Pye, H. O. T., Nenes, A., Alexander, B., Ault, A. P., Barth, M. C., Clegg, S. L., Collett Jr., J. L., Fahey, K. M., Hennigan, C. J., Herrmann, H., Kanakidou, M., Kelly J. T., Ku, I. T., Faye, McNeill, V., Riemer, N., Schaefer, T., Shi, G., Tilgner, A., Walker, J. T., Wang T., Weber R., Xing, J., Zaveri, R. A., Zuend, A. (2020). The acidity of atmospheric particles and clouds, *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 4809-4888.
- 3) Albrecht, B. A., David, A. R., Stephen, N. (1988). Observations of Marine Stratocumulus Clouds During FIRE, *Amer. Meteor. Soc.*, **69**, 618-626.
- 4) Flamant, C., Knippertz, P., Fink, A. H., Akpo, A., Brooks, B., Chiu, C. J., Coe, H., Danuor, S., Evans, M., Jegede, O., Kalthoff, N., Konare, A., Lioussé, C., Lohou, F., Mari, C., Schlager, H., Schwarzenboeck, A., Adler, B., Amekudji, L., Aryee, J., Ayoola, M., Batenburg, A. M., Bessardon, G., Bormann, S., Brito, J., Bower, K., Bumet, F., Catoire, V., Colomb, A., Denjean, C., Fosu-Amankwah, K., Hill, P. G., Lee, J., Lothon, M., Maranan, M., Marsham, J., Meynadier, R., Ngamini, J.-B., Rosenberg, P., Sauer, D., Smith, V., Stratmann, G., Taylor, J. W., Voigt, C., Yoboue, V. (2018) The dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud interactions in west Africa field campaign, *Bull. Amer. Meteor.*, **99**, 83-104.
- 5) Mohnen, V. A., Vong, R. J. (1993) A climatology of cloud chemistry for the eastern United States derived from the mountain cloud chemistry project, *Environ. Rev.*, **1**, 38-54.
- 6) Renard, P., Bianco, A., Baray, J. L., Bridoux, M., Delort, A. M., Deguillaume, L. (2020) Classification of Clouds Sampled at the Puy de Dome Station (France) Based on Chemical Measurements and Air Mass History Matrices, *Atmosphere*, **11**, 732.

富士山で雲を直接サンプリング：一滴ごとの分析から何が見えるのか？

南齋勉¹, 白倉将貴¹, 石川翔², 山本祐志³, 大河内博²

1. 静岡理科大学, 2. 早稲田大学, 3. グリーンプルー(株)

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、昨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。

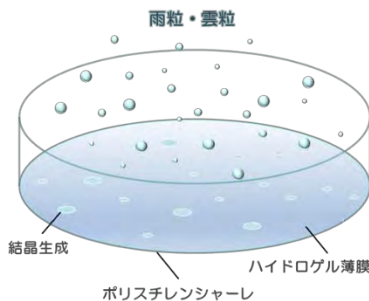


図1 結晶生成を利用した雨粒採取分析ツール

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、令和3年度には、富士山山頂測候所における直接採取(山頂班による17サンプル採取)と、富士山麓5合目太郎坊におけるドローン飛行によって、雲粒のサンプリングをそれぞれ行なった(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。

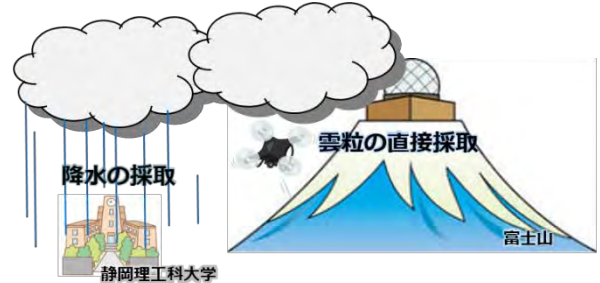


図2 地上と富士山頂におけるサンプリング

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、山頂班に依頼することで、2021年7月22日から8月25日の間、測候所が雲内に入ったことを確認した際に、雨粒採取と同様の手法で行なった。その結果、17個のサンプル採取に成功した。

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 (グリーンプルー社; 図3) 上に採取ツールを貼付し、2021年7月24日7時から9時まで高度1440mへの計4回のフライト(飛行時間: 3~6 min)を行なった。



図3 雲粒採取に用いたクアッドコプター

採取後の試料は、研究室に戻ったのち、デジタルマイクロスコープ (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わかること

雨粒と雲粒のいずれの採取においても、ゲル薄膜上の降水が採取された液滴跡の内側には、図4に示すような硫酸バリウムの結晶生成が確認された。液滴跡の直径を確認したところ、雲滴については、10-100 μm の範囲で粒径分布が確認され、20-30 μm の液滴径を持つ雲滴が最も多く確認された。この粒径分布は、これまでに報告されている雲粒の粒径分布とおおよそ一致していた⁹⁾¹¹⁾。



図4 液滴径や硫酸塩濃度の異なる雲滴

雨粒については、降水イベントによって液滴径分布は、異なる傾向が確認された。しかし、採取された17イベント中ほとんどの降水の粒径分布は100 μm を下回る大きさであり、初期降水を対象として採取したことから、一般的に報告されている雨滴径の分布¹²⁾よりも小さい結果となったと考えられる。

雨滴の濃度分布について検討した結果、液滴径分布と同様に広い分布が確認されたが、低濃度の雨滴の分布が多く、支配的であることが示された。この結果は、溜めて分析する従来の定量法では、平均化によって濃度が低く見積もられていることを示す。見積もられた雨滴体積と硫酸塩物質量から、体積加重平均濃度を算出すると、ほとんどの降水イベントにおいて、一般的に報告されている平均濃度(数十 $\mu\text{mol/L}$)よりも高濃度($\sim 1 \text{ mM}$)となり、初期降水が高濃度であることが確認された。

降水イベントごとに、得られた雨滴の「液滴跡直径」、「硫酸塩物質量」、「硫酸塩濃度」の各々の間での相関関係についてみると、ほとんどの降水イベントは、①雨滴体積の分布が狭いイベント、②雨滴中の硫酸塩濃度の分布が狭いイベント、

③雨滴中の硫酸塩物質量の分布が狭いイベント、これら3つのいずれかのパターンに分けられることが分かってきた。これらの降水イベントをもたらした雲の、雲核が形成された後の成長過程について、それぞれ以下のように推察できる。①雲滴成長が小さい雨雲、②合体を中心とした雲粒成長過程を経た雨雲、③吸湿を中心とした雲粒成長過程を経た雨雲。そして、硫酸塩以外のエアロゾルが雲凝結核となった雲粒である。これらのパターンが分かれる要因について、雨雲を含む気塊の移流経路(後方流跡線)、当日の気圧配置(天気図)、相対湿度や降水量(気象庁データ)から検討を行なったが、顕著な傾向は得られなかった。今後、大気中エアロゾルやガス濃度など大気化学データとの比較も検討している。

4. おわりに

一滴ごとの雨粒中に含まれる硫酸塩濃度分布と、液滴径分布から、雨雲の雲粒形成や成長の過程について情報が得られることが分かってきた。現在は、雨粒に関する解析のみであるが、富士山頂で山頂班メンバーによって採取された試料や、ドローンによって採取された雲粒試料についての解析が進むことで、より詳細な検討が進むことが期待される。

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.
- 12) M. A. Cecchini, L. A. T. Machado, P. Artaxo, *Atmos. Res.* **2014**, 143, 301.

微粒子が気候を変える！

—富士山体を利用したエアロゾルの気候影響の研究—

○三浦和彦^{1,2}, 大河内 博³, 加藤俊吾⁴, 和田龍一⁵, 皆巳幸也⁶, 鴨川 仁⁷, 矢吹正教⁸, 青木一真⁹, 永野勝裕¹, 森 樹大^{1,10}, 岩本洋子^{1,11}, 上田紗也子^{1,12}, 速水 洋³, 桃井裕広^{1,13}, 五十嵐博己¹, 伊藤佳樹¹, 木村 駿¹, 齋藤天真¹

1.東京理科大学, 2.富士山環境研究センター, 3. 早稲田大学, 4.東京都立大学, 5.帝京科学大学, 6.石川県立大学, 7.静岡県立大学, 8.京都大学, 9.富山大学, 10.東京大学, 11.広島大学, 12.名古屋大学, 13.千葉大学

1. はじめに

二酸化炭素の増加により地球の温度が上がっているのはご存知ですね。富士山頂の値も増加しています。でも地球を冷やす物質があることをご存知ですか？空気中に浮遊する微粒子, エアロゾル粒子です。PM_{2.5}もエアロゾルですが, それよりコロナウイルスの媒体としてご存知ですよ。この悪玉のエアロゾルですが, 地球を冷やす効果があります。太陽光を直接散乱・吸収する直接効果と, 雲の核(雲凝結核, CCN)になることで雲の特性を変える間接効果です。

エアロゾル粒子が爆発的に増加する現象があります。二酸化硫黄などの気体が粒子化する現象で新粒子生成(NPF)と呼んでいます。エアロゾル粒子濃度が高いところは都市ですが, 地球温暖化という地球規模の問題ですから地球表面の7割を占める海洋上の大気中のNPFについて調べようと, 1989年から研究船で毎年のように観測をしていました。でも, 2003年の航海までほとんど観測されません。そして, その例も自由対流圏で生成したものが高気圧のもと, 沈降したものです。確かに, 航空機観測により自由対流圏においてNPFがしばしば観測されることが報告されています。しかし, 航空機は移動が速いため, NPFのメカニズムを解明するのは難しいです。そこで富士山頂(3776m)で2006年から観測を始めました。富士山頂は自由対流圏に位置することが多く, NPFのメカニズムを調べるためには最適の場所です。

2. 2006～2019年の富士山頂の観測結果

2006年～2019年までの成果については過去の成果報告会で紹介してきた。ここではすでに投稿済み, 投稿中の成果について紹介する。

走査型移動度粒径測定器(SMPS)で測定した14.9～148.6nmの総粒子数濃度, 大きさ別に核生成モード(14.9～24.6nm), Aitkenモード(26.4～96.5nm), 蓄積モード(103.7～148.6nm)の粒子数濃度の経年変化を見ると, 総粒子数濃度は2006年～2019年の14年の間に約3分の1に減少している。特に核生成モードの減少が著しい。核生成モードのエアロゾルはNPFにより生成され, イベントが起こると急激に高濃度になる。新粒子生成イベントは2006年から2019年の全観測期間453日中291回観測された。日中は8時, 夜間は22時にイベント観測数のピー

クを示した。成長率を用いてNPF発生時刻の推定を行ったところ, 日中(80%)と夜間(20%)の両方でNPFが発生しており, 光化学反応と暗反応の両方でNPFが発生している可能性があることが示唆された。¹⁾

新粒子生成の原因の一つとしてイオン誘発核生成が考えられる。そこで, 大気イオンの測定を行ったが, 残念ながら, イオン誘発核生成はほとんど観測されなかった²⁾。

粒子数濃度の増減は直接効果にとって重要であるが, 新しく生成した粒子が全てCCNになるわけではない。自然条件の過飽和度においてCCNとなる(活性化する)粒子の臨界直径は50～150nmと報告されているが, 80nm以上の粒子数濃度(N_{80})を潜在的なCCN数濃度として用いることが多い。2014年以後のデータを解析した結果, イベントの後 N_{80} が増加する例は81回のイベント中34例, モード径が80nmを超えたのが7例, 観測された。富士山頂では増加数は85～240個/cm³と他の観測点と比較し小さいが, 増加率は150～350%と他の観測点と同程度であることがわかった³⁾。

CCNは雲凝結核計(CCNC)を用いて, 外気を吸引し測定器内で自然の雲と同程度の過飽和状態にしたときに成長する粒子数を計数することにより測定することができる。これを総粒子数濃度と比較すると, 気塊がどこから輸送されて来たかによって, CCN数の割合が異なった。

2010年の結果によると, 下層から気塊が輸送されて来た時より, 自由対流圏中を越境輸送されて来た時の方がCCN数の割合が高いことがわかった。これは輸送中に粒子が十分成長したためと考えられる⁴⁾。また, CCNの活性化は, 水蒸気過飽和度が高い, 乾燥粒径が大きい, 吸湿性が強いほど大きい, 雲粒(CD)生成には粒径分布が最も影響することが示され, 化学組成の代表値を用いてもCD数濃度を推定できる可能性が示された⁵⁾。

富士山頂への大気境界層の気塊の影響を調べる試みも行われた。山頂, 太郎坊(1,290m)のほかにも気象庁の7合8勺避難小屋(3,255m)で同時に観測し, 谷風によるエアロゾル粒子輸送の定量評価を行った⁶⁾。また, 測定器を持って徒歩観測を行い, 窒素酸化物濃度の鉛直分布を求めたり⁷⁾, 雲過程によるエアロゾル粒子の変質の調査を行った⁸⁾。

3. 太郎坊, 御殿場基地における観測

2020年, 2021年夏期ともコロナ禍のため, 山頂での観測はできなかった. 富士山頂には谷風により, 大気境界層の大気が輸送されることがある. そこで, 輸送過程を調査することを目的に2020年8月から太郎坊と御殿場基地(446m)で同時に光散乱式粒子計数器(OPC)の測定をした(図1). OPCに太郎坊ではKC01E, 御殿場基地ではKC52Cを使用した. また太郎坊ではSMPSによる粒径分布とスカイラジオメータにより光学的厚さの測定をした.



図1 観測場所の位置と高度

(<https://npofuji3776.org/infrastructure/bases.html>)

図2に2020年8月に太郎坊と御殿場基地で同時に測定したOPCの結果を示す. 太郎坊では26日21時過ぎに0.3, 0.5 μm 以上の粒子濃度の減少が見られるが, 御殿場基地では26日の夕方から減少している. また, 29日夜, 31日夜の減少にも時間のズレがある. 今後, 風系など気象解析により輸送過程を調べたい.

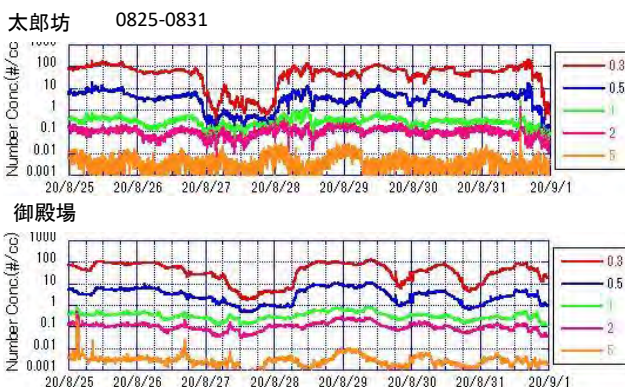


図2 太郎坊(上), 御殿場基地(下)で測定した0.3 μm 以上の粒子濃度の時間変化(2020年8月25~31日)

図3に2021年7月~8月の15~150nmの総濃度と核生成モード(15~25nm)の粒子の割合の時間変化を示す. 台風, 低気圧, 前線の影響を受けて低濃度を示すが, それ以外の日は日中高く夜間低いという規則正しい日

変化を示すことが多い. 図4に7月23~24日を拡大して示す. 総濃度とAitkenモード, 累積モードの粒子濃度, 核生成モードの割合を示す. 全粒径範囲にわたり, 23日7時~8時頃にスパイク状, 10時~15時になだらかな増加が見られる. 24日も7時頃にスパイク状, 15時過ぎに増加が見られるが, Aitkenモード, 累積モードの粒子濃度は増加していない. 24日は新粒子生成イベントと考えられるが, 23日は SO_2 濃度も高く長距離輸送が考えられる. 浅間山の噴煙の影響を捉えたものかもしれない.

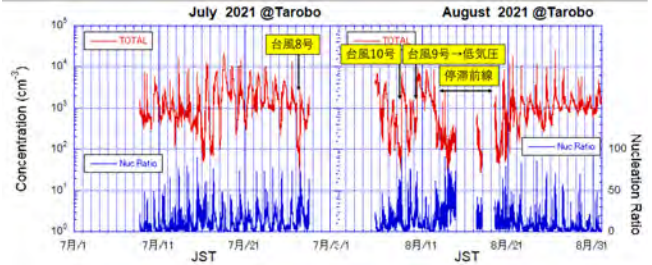


図3 総粒子数濃度と核生成モードの粒子濃度の割合の時間変化(2021年7月, 8月)

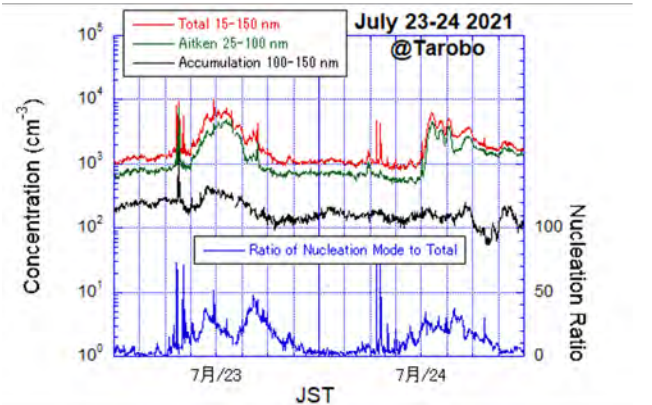


図4 総粒子濃度, Aitkenモード, 累積モードの粒子濃度と核生成モードの粒子濃度の割合の時間変化(2021年7月23日~24日)

謝辞

本研究の一部は, 科研費基盤研究B(19H04238)(代表 矢吹正教, 2019-2021年度)の助成により行われた.

参考文献

- 1) 五十嵐博己ら, エアロゾル研究, **37**, 2022 (印刷中)
- 2) 長岡信頼ら, *J. Atmos. Elect.*, **33**, 107-114, 2013
- 3) 木村駿ら, エアロゾル研究, 2022 (投稿中)
- 4) 長谷川朋子ら, エアロゾル研究, **27**, 189-196, 2012
- 5) Iwamoto et al., *Appl. Sci.*, **11**, 8439, 2021
- 6) 藤代恵史ら, エアロゾル研究, **24**, 123-128, 2009
- 7) 室崎将史ら, *大気環境学会誌*, **41**(6), 347-354, 2006
- 8) Ueda et al., *Atmospheric Research*, **137**, 216-227, 2014

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

村田浩太郎¹, 米持真一¹, 大河内博², 鴨川仁³

1.埼玉県環境科学国際センター, 2.早稲田大学, 3.静岡県立大学

1. はじめに

雲は水滴や氷が上空に浮かんでいるものであるが、水分だけで雲ができるわけではない。大気中の微量な成分、とりわけ、微粒子(エアロゾル粒子)の存在が雲の水滴や氷、ひいては雨や雪の形成に必要不可欠である。

我々が日常的に目にする降水の 8 割程度は雲の氷(氷晶)の形成が関係している。氷晶は雲の中の水分を効率的に下に落とすようにはたらかけるからである。

上空ほど気温が低いものの、理論的には上空に浮かぶ微小な氷晶の形成にはかなり上空の低温環境(-40℃)が必要である。しかし、実際の大気中には氷形成を促進する「氷晶核」という微粒子が存在するために、より低い高度(高い気温)で氷晶が形成される。氷晶核は我々が目にする雲や降水の種になっているともいえる。

上空に存在する氷晶核は情報が少なく不明な点が多いことから、我々は富士山頂で観測を行なっている。2021 年は連続観測を実施することができたので報告する。

2. 観測方法

2021 年 7 月 12 日から 8 月 28 日まで富士山測候所 3 号庁舎外、山頂の西側にあたる場所に試料採取装置を設置した。極めて細かい目(0.2 μm)のフィルターで空気を吸引濾過することで、大気中の微粒子を集めるものである。時間は 8 時~16 時(日中)と 20 時~4 時(夜間)の 8 時間ずつに分けて採取した。

試料は冷蔵で保管・輸送し、実験室に持ち帰った後に分析を行なった。試料フィルターをカットし、超純水に浸すことで試料液を作成した。不純物の少ない超純水では、冷却しても-35~-34℃程度まで凍結しない。しかし、試料液には山頂大気中に存在していた氷晶核となる微粒子が存在しているので、これよりもかなり高い温度で凍結する。この差を測ることで山頂大気中に存在していた氷晶核数を推定した。

3. 結果と考察

計測された氷晶核数濃度を図 1 に示す(現在分析済の 8 月 11 日分まで掲載)。横軸は活性化温度で、縦軸はその温度以下ではたらく空気 1 リットルあたりの氷晶核数を示している。他山岳観測サイトで報告された平均的な濃度範囲と比較すると、およそ同様の濃度ではあったものの変動幅が比較的広い結果であった。富士山頂では 1972~1976 年に氷晶核の観測がなされており¹⁾、その結果も併せて示す(図 1 中

ひし形)。同じ手法によるものではないので厳密な比較はできないが、同程度の濃度であった。このことは、この 50 年あまりの間に氷晶核数が大きく変化しておらず、自然起源の粒子が主要な氷晶核であることを示唆している。氷晶核としてはたらく微粒子として代表的なものは鉱物であるといわれ、富士山頂の上空においても主要な氷晶核は自然起源の鉱物であると考えられる。興味深い結果として、日中の方が夜間よりも氷晶核数濃度が高い傾向がみられた。日中は谷風が吹き、山体表土由来の鉱物が山頂に輸送されることが原因であると推察された。この昼夜の変動が氷晶核数濃度の変動幅を広げていたと考えられる。山体が氷晶核の発生源となるのであれば、雲や雨の形成において富士山は、斜面によって上昇気流をもたらすだけでなく、上空への効率的な氷晶核の供給源となっている可能性がある。発表では富士山の表土が山頂大気中の氷晶核を説明し得るのか、実施した解析の結果も紹介する。

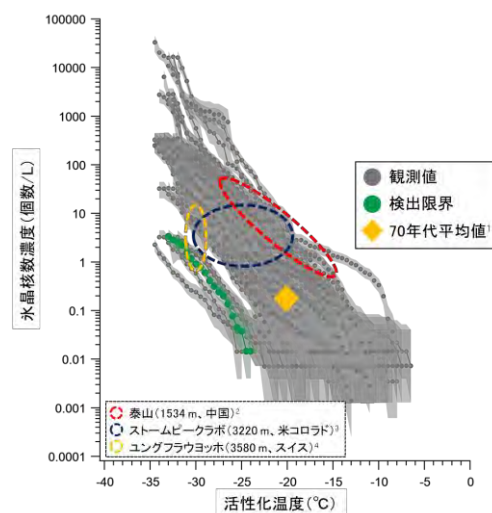


図1 2021年7月12日~8月11日に観測された氷晶核数濃度。他山岳観測サイトでの濃度範囲も記載。

参考文献

- 1) 名古屋大学水圏科学研究所編(1991). 大気水圏の科学—黄砂, pp.200-215, 古今書院.
- 2) Chen et al. (2021). *Atmos. Res.*, **253**, 105426.
- 3) Hodshire et al. (2022). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2022-29>.
- 4) Brunner et al. (2021). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2021-710>.

富士山周辺で豪雨は増えている？：豪雨災害と大気汚染の気になる関係

～2021年8月には「大気の大川」が富士山に大雨をもたらした～

米戸鈴美香¹, 大河内博¹, 皆巳幸也², 加藤俊吾³, 和田龍一⁴, 三浦和彦⁵, 土器屋由紀子⁵, 畠山史郎⁵, 山田佳裕⁶
1.早稲田大学, 2.石川県立大学, 3.東京都立大学, 4.帝京科学大学, 5.富士山環境研究センター, 6.香川大学

1. 日本全国で激しい雨が増えている

近年、日本国内では**記録的短時間大雨**という、数年に一度程度しか発生しない短時間の大雨が多発しています(図1)。2017年から2020年は年間100回程度を推移しています。その結果、山間部では大規模な土砂災害が発生しています。大雨の発生要因として、地球温暖化による表層海水温度の上昇に伴う大気中水蒸気量の増大が指摘されています。同じ地域に大量の水蒸気が流れこみ、次々に積乱雲が発生して大雨をもたらす**線状降水帯**が被害を増大しています。最近では、大気中を大量の水蒸気が帯状に流れる**大気の大川**が日本国内に大雨をもたらすことが明らかになってきています。今後、さらに豪雨が増加して災害が頻発化・激甚化する恐れがあり、豪雨生成メカニズムの解明は喫緊の課題となっています。

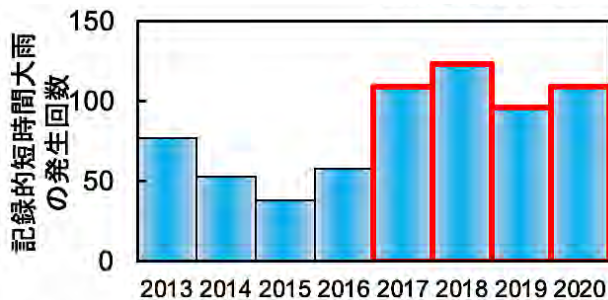


図1 日本全国における記録的短時間大雨の発生回数

2. 山間部でも激しい雨が増えている

“山の天気は変わりやすい”と言われます。山間部では、夏の晴天日の午後になると、局地的に対流雲が発達し、激しい雨や落雷が発生します。これは特別なことではなく、自然現象です。私たちは東丹沢で渓流水調査を15年以上続けていますが、調査でお世話になっている丹沢ホーム・中村道也さん(NPO 法人丹沢自然保護協会理事長)との雑談の中で、「丹沢では激しい雨が増えている」と伺いました。これまで都市部でゲリラ豪雨研究をしていましたが、丹沢における過去40年間の降雨量も調べました。その結果、最近の20年間で時間雨量30mmを越える激しい雨(以後、豪雨)が南斜面で2倍以上に増えていることが分かりました。そこで、日本全国の山間部における豪雨の実態解明に乗り出しました。

図2には、標高400m以上の降雨量観測地点を山間部と定義して193地点における過去40年間の暖候期(6月～10月)における年間豪雨発生回数の平均値を示しています。豪雨は太平洋側の南西斜面で最も多いことが分かります。南部ほど高く、北部では少ない傾向があり、沿岸部ほど高く、内陸

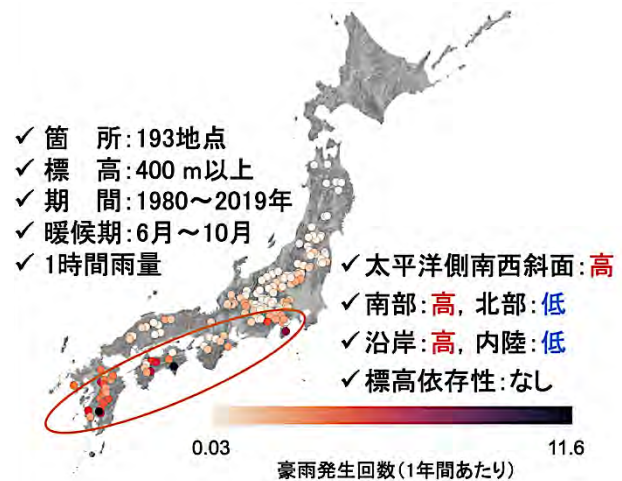


図2 日本全国における年間豪雨発生回数の分布

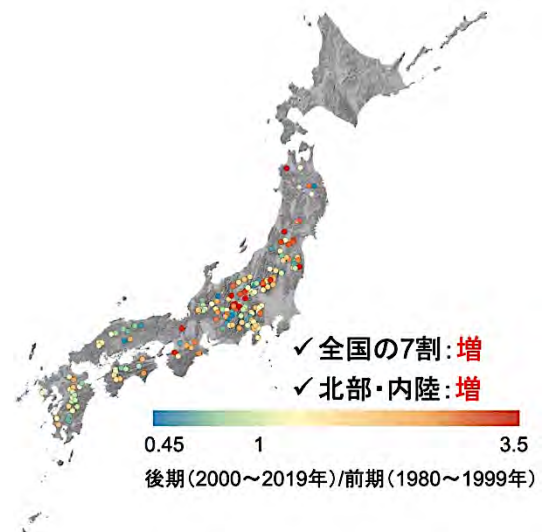


図3 日本全国における豪雨発生回数の過去40年間の変化

ほど発生頻度が低下する傾向が見られました。図3には、過去40年間の豪雨発生回数の変化を示しています。前期を1980年から1999年の20年間、後期を2000年から2019年の20年間とし、前期と後期の比をプロットしています。豪雨発生回数は各地点で増加傾向にあり、7割の観測地点で増加していることが分かりました。豪雨発生回数は内陸部や北部で著しく増加しましたが、図2で示したように、これらの地域では豪雨発生回数がもともと少ない地域でした。この要因解明にはさらなる解析が必要ですが、地球温暖化に伴う大気中水蒸気量の増大が影響している可能性があります。

3. 富士山周辺で豪雨は増えている？

富士山周辺における豪雨発生回数を、過去10年毎(I期:1980-1989年, II期:1990-1999年, III期:2000-2009年, IV期:2010-2019年)に集計し、豪雨発生要因を台風性、前線性、局地性豪雨(台風性、前線性豪雨以外の豪雨)に分けて示しています。各地点ともに、豪雨発生要因としては台風が多くの割合を占めていることが分かります。

富士山南東麓では、過去20年と最近20年を比較して局地性山間部豪雨の発生回数が増加傾向にありました。前線性豪雨がIV期で増加傾向にあり、2010年代に豪雨が増加した原因は局地性豪雨および前線性豪雨によります。

富士山南西麓では、前線性や台風性豪雨の増加がIII期間からIV期の増加原因となっていました。

富士山北麓では、前線性豪雨の発生回数が非常に少なく、豪雨の発生要因としては台風が多くの割合を占めていることが分かりました。豪雨発生回数は増えていません。

以上のことから、富士山周辺では南斜面で豪雨が増加していますが、主な要因は前線の発達であり、局地性豪雨の増加も一因です。一方、北側斜面では前線や局地性豪雨の影響は小さく、豪雨の増加傾向は見られませんでした。

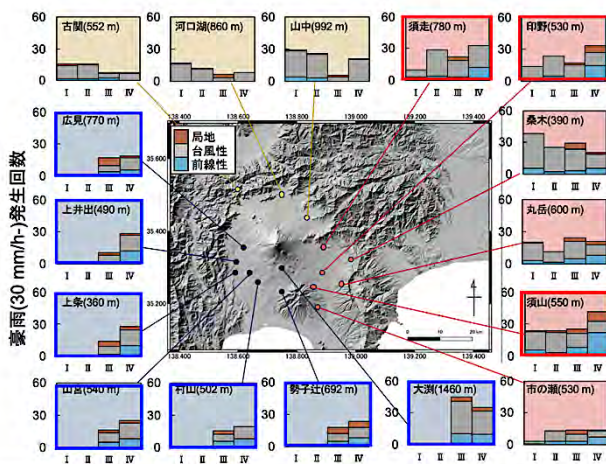


図4 富士山周辺における豪雨発生回数。

I:1980-1989, II:1990-1999, III:2000-2009, IV:2010-2019

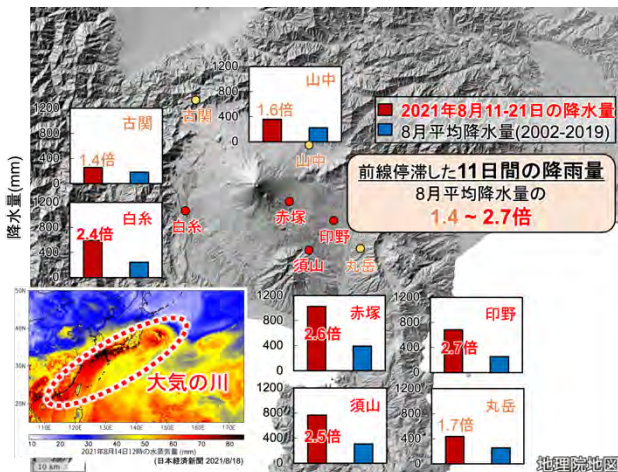


図5 2021年8月に「大気の川」が富士山に大雨を降らせた

2021年夏季には富士山頂・馬の背は大規模な土砂流出が起き、地元の方も驚いていました。図5には、富士山周辺における2021年8月11-21日の降水量を2002-2019年の8月平均降水量と比較しています。南斜面(白糸, 赤塚, 印野, 須山)では、2.5倍以上の降水量があったことが分かりました。このときには、「大気のカ」の存在が確認されています。

4. 局地性豪雨の生成には大気汚染が関係か？

図6には、富士山南東麓御殿場口太郎坊(標高1290m)で採取した雨水を通常降雨と豪雨に分けて、pH, 化学組成, 大気沈着量を示しています。局地性豪雨はpHが最も低く(pH 4.76), 酸性物質由来である硫酸イオンと硝酸イオンの割合が高く、大気沈着量が前線性豪雨と同程度に高いことが分かります。つまり、局地性豪雨は酸性雨であり、短時間に大量の酸性物質を森林生態系に降り注いでいることになります。一方、台風性豪雨はpHが最も高く、海洋由来のナトリウムイオンと塩化物イオンの割合が高く、綺麗な雨です。

局地性豪雨は夏の午後に発生することから、海風とともに沿岸部の都市部で放出された大気汚染物質が輸送され、対流雲を作る核になったり、雲に溶け込んでいることが考えられます。局地性豪雨がいつどこで降るのかを予測するのは難しく、採取は大変なのですが、2020年夏季には御殿場口太郎坊と御殿場市内で同時採取に成功しました。発表時には、その結果と合わせてご紹介します。

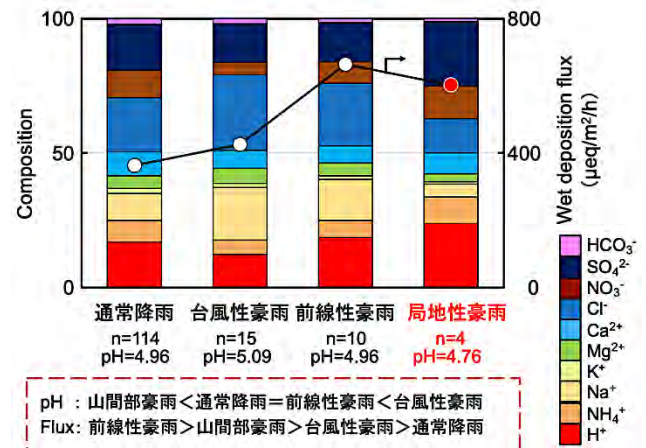


図6 富士山南東麓における雨水 pH と大気沈着量

5. 謝辞

この研究は、文科省科研費・基盤研究 A「山間部における夏季豪雨形成と大気汚染の相乗環境影響の解明」(19H00955), 一般財団法人WNI気象文化創造センター「Comparative Research of the Effect of Air pollution on the Formation of Heavy Rainfall in the Tropical and Temperate Regions under Global Warming: for the development of human resources for the observation of meteorology and air quality in Cambodia」より行われました。

防災にむけた富士山での火山性ガスモニタリング

○加藤俊吾¹, 中村まりあ¹, 辰巳紘奨¹, 矢田茂久¹, 鴨川仁², 土器屋由紀子³

1 東京都立大学, 2 静岡県立大学, 3 富士山環境研究センター

1. はじめに

富士山は火山であり、いつ活発な状態になってもおかしくない。そのため、富士山において火山性ガスをリアルタイムで一年を通して分かるようになれば、防災に役立てることができる。しかし、大気微量成分の観測には高価で大型の計測装置が必要であり消費電力も大きいので、富士山頂で商用電源が利用できない期間(夏季以外)での測定は困難である。そこで本研究では、電力消費の少ない火山ガスセンサーを用いて富士山頂でのリアルタイム通年観測を行えるようにした。また、山頂以外からの噴火も起こりうるため、小型のシステムを携帯で様々な地点で火山性ガスを測定できるようにした。

2. 小電力の火山性ガス(SO₂, H₂S)センサー

火山性ガスとして二酸化硫黄(SO₂)および硫化水素(H₂S)の測定をおこなうようにした。小電力で動作するAlphasense社の電気化学ガスセンサー(SO₂-B4 および H₂S-B4)を用いた。性能評価のため、実験室内における標準ガスを用いた SO₂ 計との比較測定実験では数 ppb までの低濃度の SO₂ の検出が可能であった。しかし、実際の大気の観測においては温度などの影響を受けてガスセンサーの出力値が数十 ppb 変動をしてしまった。そのため、低濃度領域での正確な測定は困難であることが分かった。

3. 実大気での火山性ガスの検出(大涌谷での観測)

実際の大気で火山性ガスを検出できるか確認するため、箱根大涌谷において大気観測テストをおこなった。乾電池でガスセンサーやデータロガーを動作させるようにした。火山性ガスの影響をうけた地点では数百 ppb となる SO₂ および H₂S が検出され、実大気でもこのセンサーにより近傍から発生した火山性ガスを捉えられることができ噴火の影響をとらえる用途には使用できることが確認できた。

4. 富士山頂での ELTRES を用いた越冬観測 (2019 年夏～)

防災の用途には、SO₂ および H₂S の観測値をリアルタイムで把握できる必要がある。そのため、商用電源がない期間でも富士山頂から測定データを通信する機器が必要になる。

ELTRES は SONY が開発した低消費電力長距離通信(LPWA)である。ELTRES によりガスセンサーの電圧出力を通信するようにした。2019 年夏の閉所時に SO₂ センサーおよび H₂S センサーと ELTRES を寒冷地用のバッテリー数個で動作させるシステムを設置した。リアルタイムで転送されたデータは本 NPO のウェブサイト上で一般に公開し閲覧できるようにし、越冬観測データのリアルタイム公開に成功した。H₂S センサーが 2020 年 4 月に、SO₂ センサーが 2020 年 7 月に故障して濃度を正確に測定することができなくなった

が、ELTRES はその後も動作し続け 2021 年 7 月に山頂でメンテナンス作業を行うまでデータを転送し続けた(2020 年夏に富士山頂でのメンテナンス作業が不可能であった)。通常なら翌年夏にメンテナンスを行えるため、このシステムにより火山性ガスの越冬モニタリングが行えることが確認できた。

5. 商用 ELTRES での富士山頂観測(2021 年夏～)

ELTRES が一般利用の商用化が始まったため、2021 年夏の終わりからは商用の ELTRES を利用して火山ガス越冬観測を行うようにした。これまでの経験から越冬に必要な2個の寒冷地用バッテリーにより電源供給をおこなっている。商用機材の不具合等もあるが、山頂での火山性ガスの観測値をリアルタイムで閲覧できるウェブサイトを作成し、どこからでも状況を確認できるようにしている。

閲覧サイト https://www.fujimonitor.org/volcanic_gas_list

6. 太郎坊での火山性ガス測定

噴火は富士山頂以外の地点からもおこる可能性があるため、他の地点にも火山性ガスモニタリングを増やしていければより効果的な防災情報を得られる。バッテリー1個だけで野外に設置するシステムを作成し、5 合目付近にある太郎坊においてテスト観測をおこなっている。

7. 登山道での観測(濃度マップの作製)

さらにさまざまな地点で測定を行うために、乾電池駆動で携帯できるシステムを作成した。これを携帯して富士吉田ルート、御殿場ルート、須走ルート、宝永火口で測定し、火山性ガスの濃度マップを作成した(図)。また、携帯端末での測定位置・濃度をリアルタイムでウェブサイトに表示できるようにし、測定結果をより活用できるようにした。



図 富士山の複数の登山道での濃度マップ

謝辞: 本研究は新技術振興渡辺記念会の援助を受けて行われました。また、多くの観測関係者に感謝いたします。

太郎坊における全磁力測定とそのデータ評価

長尾年恭¹, 鴨川 仁²
1.東海大学, 2.静岡県立大学

1. はじめに

良く知られているように、富士山の最後の噴火は1707年の宝永の噴火であり、現在まで300年以上も噴火がない状態が続いている。火山学の常識として、富士山は極めて若い火山で、将来噴火が発生する事は100%確実である。首都圏に近い事から、噴火はIT化された日本に極めて大きな被害を与えると考えられている。

昨年度の成果報告会では、山頂での試験観測の結果や、2020年10月に設置した太郎坊観測点の稼働状況について報告した。

2021年度の当初計画では、富士山頂観測点に磁力計を設置する予定であったが、やはりコロナの状況が改善せず、山頂での作業が大幅に制限される状況となった。そのため、2020年度に設置した太郎坊地磁気観測点周辺の環境調査と、地磁気データ表示のためのポータルサイト開設や主成分解析(PCA)および独立成分解析(ICA)を組み込んだ地磁気データ解析システムを構築した。

2. 2021年度の研究

観測データを評価する上で、センサーの位置が物理的に変化した事(センサーポールが不可抗力のために傾く等)等による人工的な変動なのか、真の自然界の変化なのかを判断するためには、極力センサー周辺の磁気勾配が小さい事が望ましい。しかし太郎坊は玄武岩質の溶岩に周囲を囲まれており、富士山における地磁気観測では、どこに観測点を設置してもこの問題から逃げる事は出来ない。

この問題を少しでも解決するため、2021年度は、太郎坊観測点近傍センサー近傍の全磁力環境調査を実施した。図1は2021年10月31日に実施した太郎坊観測点センサー近傍の全磁力分布である。

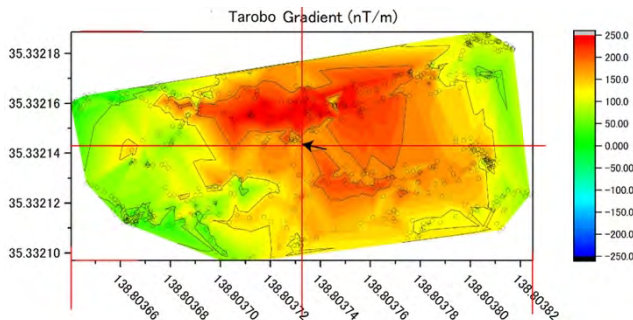


図1 センサー(図の中央)周辺の全磁力勾配測定結果

また火山監視では、ポータルサイトでのリアルタイムのデ

ータ公開およびそのデータの見方を一般市民に判りやすく解説する事が、火山噴火に対する基礎知識の底上げにも、啓発活動としても重要である。令和3年度にはその第一歩として、太郎坊観測点のデータを以下のURLで公開した。

https://www.fujimonitor.org/total_magnetic_list

図2は全磁力データの例で、上記ポータルサイトから取得したデータである。

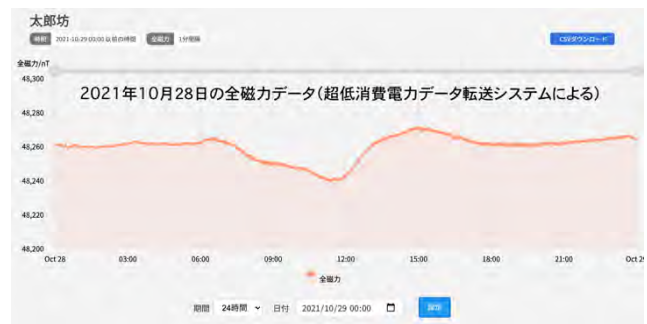


図2 2021年10月28日の24時間の全磁力データ

今回開発した地磁気データ表示システムは、LPWA(Low Power Wide Area)通信を用いてデータ転送されたものである。本研究のLPWA通信には(株)ソニー独自の低消費電力広域通信規格であるELTRESを用いた。ELTRESは、長距離安定通信、高速移動体通信、低消費電力という特長を持つ(株)ソニー独自の低消費電力広域通信規格である。

3. 磁気データ解析システムの構築

磁気データ解析システムは、プラットフォームをPythonとして開発を行った。組み込んだアルゴリズムは主成分解析(PCA)および独立成分解析(ICA)である。

解析には太郎坊(tarobo)の他、東大地震研(FJ1, today), 国土地理院(富士吉田, gsi_fujiyoshida)および気象庁・柿岡地磁気観測所の全磁力データを用いた。ここでは事例解析として、2021年1月のデータについてPCAおよびICAを適用した予察的な結果を報告する。

図3および図4はPCAおよびICAの結果である。PCAでは、第1主成分は当然の事ながら地磁気日変化となる。しかし第2主成分にも日変化成分が残っているのがわかる。ICAでは、固有ベクトルが斜交するので、PCAのような単純な結果となっていない。2021年1月では、第4主成分に磁気嵐の数日単

位の変動が残っている事が見て取れる。

PCA も ICA も欠測が解析に大きな影響を与えるので、今後このような解析を定常的に実施するには、東大地震研や国土地理院とも緊密に連携して、観測点メンテナンスを含めて、まずは研究者レベルで富士山地磁気観測に関する共同研究を行っていく事が肝要と考える。

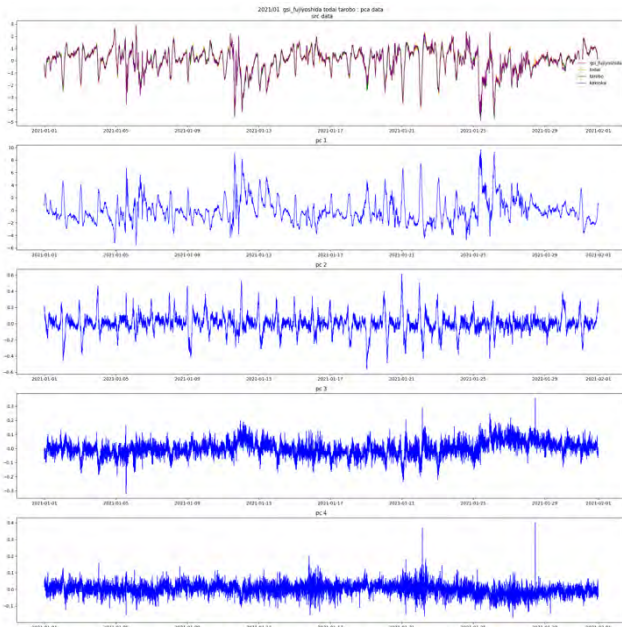


図3 PCAを適用した例

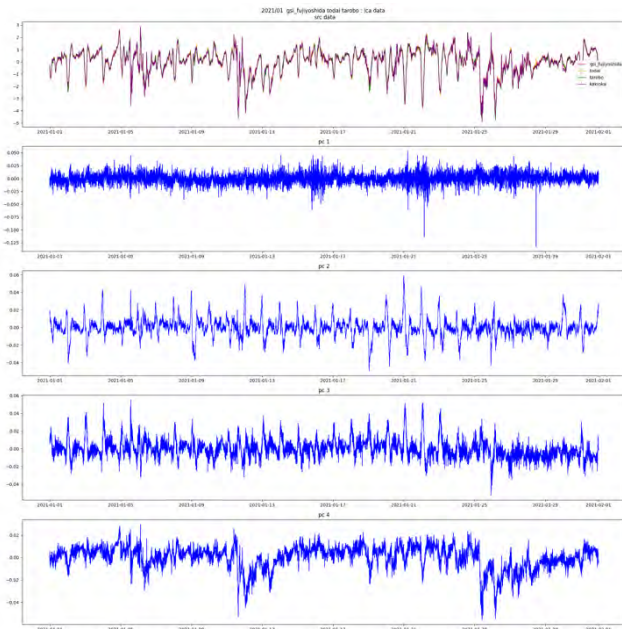


図4 ICAを適用した例

4. 謝辞

太郎坊センサー周辺の全磁力測定では、テラテクニカ社のご支援を頂いた。

また本研究は、以下の各種研究の助成を受けて実施されました。ここに改めて謝意を表します。

- 1) 科学研究費・基盤研究(C):課題番号:21K04613, 課題名「多角的な監視による富士山の噴火予測精度高度化の研究」
- 2) 一般財団法人 WNI 気象文化創造センター, 2021 年度気象文化大賞研究助成「Geomagnetic monitoring for predicting volcanic eruption at Mt. Fuji」
- 3) 東京大学地震研究所「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」, 公募研究(課題番号:KOBO17, 課題名「富士山頂における全磁力通年観測」)

2021年8月18日富士山頂で発生した上向き雷放電前の高エネルギー放射線について

鴨川仁¹, 鈴木智幸¹, 安本勝², David Smith³, John Ortberg³, 榎戸輝揚⁴, 鶴見美和⁴, 和田有希⁵

1. 静岡県立大学, 2. 富士山環境研究センター, 3. カリフォルニア大学サンタ・クルーズ校,
4. 理化学研究所, 5. 大阪大学

1. はじめに

近年、雷放電に伴って高エネルギー放射線が発生することが数多く報告されている¹⁾。持続時間はミリ秒オーダーであり、雷放電に伴って電子が制動放射することによって発生し、ショートバーストと呼ばれている²⁾。また、雷雲内の電場が起源となる1～数分に渡る MeV オーダーの放射線も検知される。これはロングバーストと呼ばれる³⁾。日本について言えばどちらの放射線バーストも日本海沿岸地域で発生する冬季雷雲で多数報告されているが²⁾³⁾、富士山での夏季雷雲観測においては、ロングバーストしか検知報告⁴⁾がない。

本稿では2021年8月18日午前10:46:31 (JST)に旧富士山測候所で発生した落雷時・前についての放射線観測について報告する。

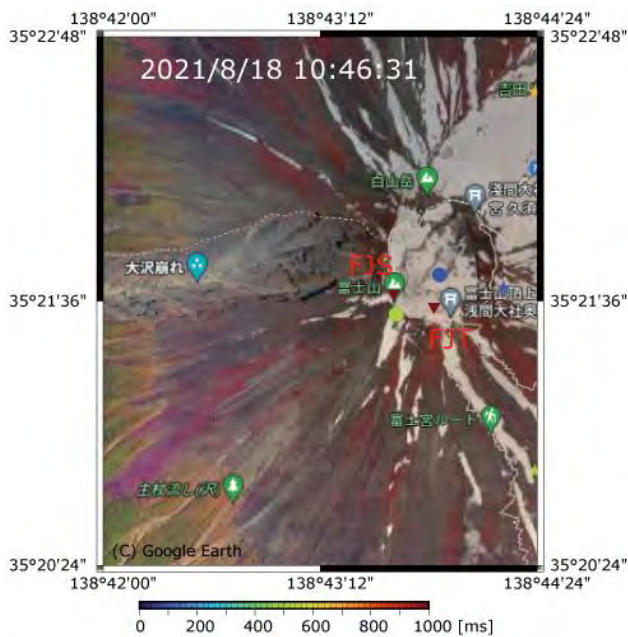


図1 観測場所(▼)およびLIDEN(●)およびBlitzortung(★)によって検知された落雷点。2021/8/18 10:46:31 JST から1秒間の間に検知された落雷を示す。色はミリ秒を表す。

2. 観測

観測は旧富士山測候所(FJS)および富士宮口登山道口そば(FJT)にて行った(図1)。

放射線測定器には5インチのNaIシンチレータと5インチ・1インチのプラスチックシンチレータ(以下それぞれ NaI,

LgPI, SmPI と表記する)を搭載した GODOT (Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms; <http://godot.jp/about/>)²⁾を用いている。本機器は、ロングバーストのみならずショートバーストの検出に優れた性能を発揮する。設置は測候所1号庁舎2階屋内で行っている。多点放射線観測にすぐれた CoGaMo⁵⁾も FJS および FJT に設置した。FJS では GODOT に隣接する形で測定した(図2)。



図2 旧富士山測候所1号庁舎2階に設置された測定装置。

大気電場測定としてフィールドミルを1号庁舎屋根に設置した。使用機器は強電場でも飽和値にならないほどの測定レンジが広い音羽電機工業社製 LATOM を用いた。サンプリングは 20 Hz である。

測候所と山麓をつなぐ送電線内を流れる電流を計測するためのログスキーコイルを4号庁舎に設置している⁶⁾。

落雷位置評定には LIDEN および Blitzortung のデータを用いた。レーダーデータは X-Band MP レーダーデータ(DIAS 提供)を用いている。

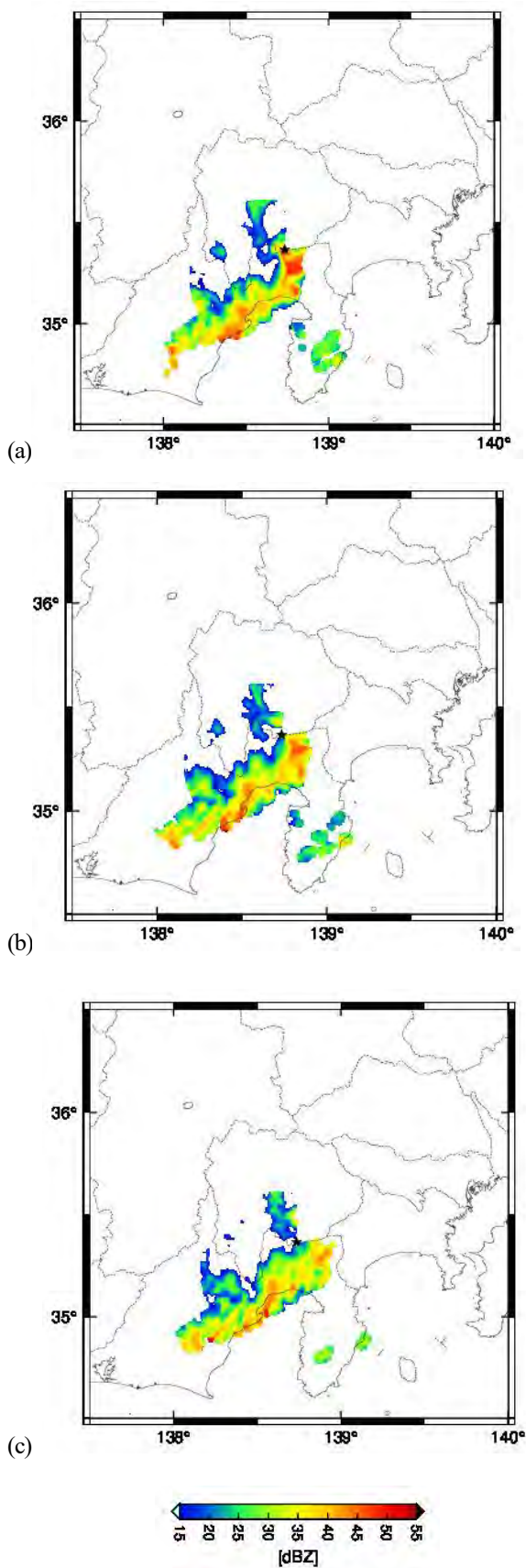


図3 2021年8月18日のレーダー反射強度図。(a) 10:40 JST, (b) 10:45 JST, (c) 10:50 JST。星印は富士山頂。X-band データは富士宮観測点のものを使用。

3. 測定結果

2021年8月18日は富士山南麓周辺も含めて停滞前線が存在し、山頂は極めて天候が悪い状態であった(図3)。10:46:31には、2つの落雷が山頂にて LIDEN および Blitzortung で 31.1 および 31.5 秒にて検知された(図1)。また、ログスキーコイルは、31秒周辺に2つの直撃雷の検知がなされた(時刻のずれは1秒以内)。2つの落雷のうち1つ目は負極性上向き雷、2つ目は前駆放電を伴わない負極性の雷撃であった。2つの落雷位置評定では場所が離れているがログスキーコイルの過去の研究成果⁶⁾からこれら2つの落雷は測候所で発生したと考えられる。一方、1号庁舎内では、窓越しから漏れてくる閃光と雷鳴が2台のビデオカメラにて収録されており、動画のフレーム解析を行ったところ、閃光は、4回捉えていた。時間間隔から推定すると2, 3番目が2つの落雷に該当すると考えられる。2つの閃光と雷鳴の時間差から推定すると1号庁舎から約34m離れた地点が大地との放電点と推定された。これは、測候所の避雷針などがある2,3号庁舎館の設備あたりとなる。

このときの GODOT のカウント値の時系列を示したのは図4である。落雷時の前30秒ぐらいから NaI のカウント値が最大50%ほど、落雷時まで増加し続けている。落雷直後は定常状態に戻った。一方、落雷時は、SmPI のみ瞬間的なパルス的なカウント値の上昇がみられるが、NaI および SmPI では同種の増加が見られないこと、LgPI は電磁波のノイズの影響を受けやすいことから、これは雷放電によるの誤認識と判定した。CoGaMoも同様なロングバーストをFJSにて検知していたが、FJTでは検知がなされていなかった(図5)。したがってかなり局地的な電場が起因していたと考えられる。

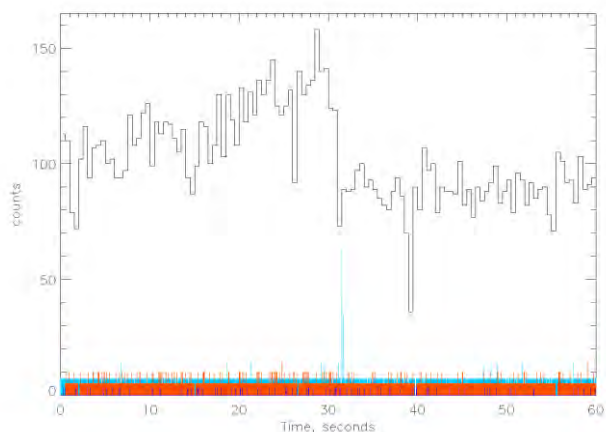


図4 2021年8月18日 10:46:00 JSTからの GODOT による高エネルギー放射線の検知数。実線は NaI の 0.5 秒毎のカウント数。赤線、水色線、青線は NaI, LgPI, SmPI の 10 ms ごとのカウント値。

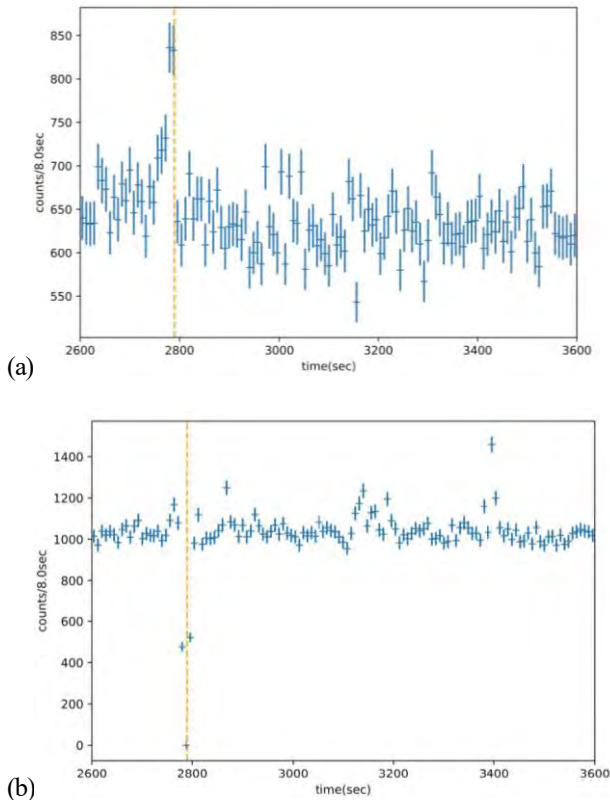


図 5 CoGaMo によって取得されたカウント値。点線は落雷時間。Bin 幅は8秒。(a) FJS, (b) FJT。

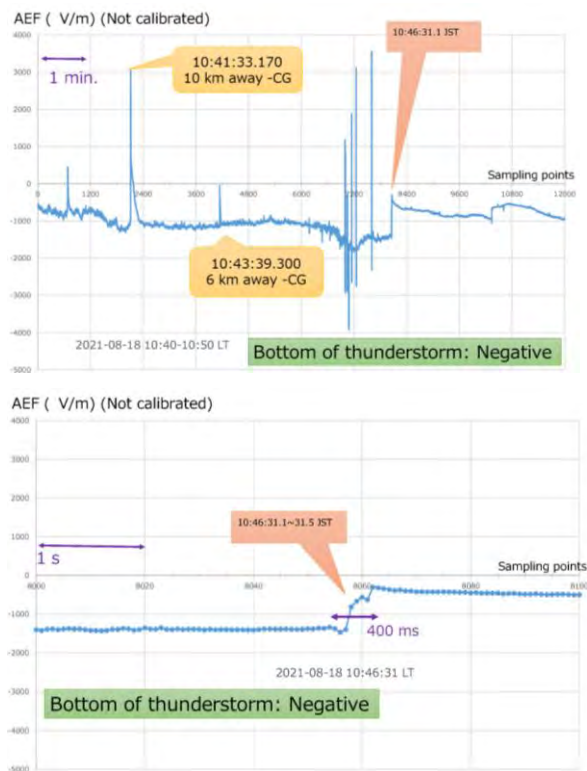


図 6 大気電場データ。(a) 10:40-10:50 までの時間帯を記載。(b) 10:46:31 周辺を記載。

図 6 に、フィールドミルの時系列を示した。落雷時に負の電場のオフセットが発生しており、その変化は 400 ms の間で 2 つの落雷の間に雷雲内電荷が変化した。電場値は3分の1程度になっていることから中和電荷も3分の1程度になったと類推できる。

4. まとめ

2021年8月18日10時46分31秒に旧富士山測候所に2つの落雷が発生した。そのうち1つは負極性上向き雷放電であった。落雷時には、ショートバーストは検知されなかった。落雷前には、ロングバーストが観測された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H02419 「富士山頂高度を活用した落雷減災のための多角的雷研究」の助成を受けたものです。本研究は NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれた。本研究では、国土交通省が提供する XRAIN raw データを利用した。またこのデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。

参考文献

- 1) Dwyer, J. R., David, D. M., and Cummer S. A (2012), High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, *Space Sci. Rev.*, **173**, 133-196.
- 2) Smith, D. M., Bowers, G. S., Kamogawa, M., Wang, D., Ushio, T., Ortberg, J., Dwyer J. R., Stock, M., (2018), Characterizing upward lightning with and without a terrestrial gamma-ray flash, *J. Geophys. Res.*, **123**, 10.1029/2018JD029105.
- 3) Torii, T., Sugita, T.; Kamogawa, M.; Watanabe, Y.; Kusunoki, K. (2011)., Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L24801.
- 4) Torii, T., Sugita, T.; Tanabe, S.; Kimura, Y.; Kamogawa, M.; Yajima, K., Yasuda, H. (2009), Gradual increase of energetic radiation associated with thunderstorm activity at the top of Mt. Fuji, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L13804.
- 5) 榎戸輝揚ら (2022), シチズンサイエンスを活用した金沢での放射線マッピング「雷雲プロジェクト」, 大気電気学研究, Vol. 16, No. 1 (No. 100) (印刷中).
- 6) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2022), 富士山体上接地線電流による雷観測系, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌) (印刷中)

2021年8月30日首都圏で発生したブルースターターと富士山からの観測

鈴木智幸¹, 鴨川仁¹, 櫻井南海子², 伊東耕二³
1.静岡県立大学, 2.防災科学研究所, 3.所属無

1. はじめに

雷雲上空で発生する放電現象は高高度放電発光現象と呼ばれ, その発生高度, 形状, 成因等の違いにより, エルプス, スプライト, 巨大ジェット, ブルージェット, ブルースターター等がこれまでに発見されている. 我々のグループでは, 富士山山頂からこれらの現象を撮影するため, 2012年から3号庁舎外に高感度モノクロ CCD カメラを複数台設置し, エルプス, スプライト, 巨大ジェットの観測に成功してきた. 2019年からは, 高感度カラーFHD(ハイビジョン)カメラも導入して観測を実施し, 非常に高画質な雷雲と雷放電画像が取得できることを確認している.

2021年の観測では, 初めて2事例のブルースターターのカラー画像が取得された. ブルースターターやブルージェットは, 発達した雷雲のオーバーシュートしたもともと発達した雲頂から直接放出される逆円錐状の細長い青色の放電発光現象である.

今回は, 昨夏の観測と富士山山頂から初めてカラー動画とえられた, 2021年8月30日に埼玉県と群馬県県境付近で発生したブルースターターと関連する雷放電, その親雷雲についての解析結果を報告する.

2. 2021年の観測結果

2020年夏に引き続き, 新型コロナ流行に伴い, 山頂での観測に様々な制約が付くことが予想され, 山頂に行くことができないことも想定されたことから, これまで, 使用していた固定型のカメラシステムの設置を断念し, 山頂班に撮影を依頼することを前提として, 小型の4Kカメラと小型三脚及び小型三脚にソーラーパネル付バッテリーを複数搭載し, 半日以上(地上で12時間までの連続撮影試験を実施済)の連続動画が撮影可能な簡易光学観測システムを構築した(図1). 時刻の特定のため, GPSで時刻同期が可能な時計の時刻表示を定期的に撮影することで, 可能な限り正確な時刻が分かるようにした. このカメラによる観測は, 8/24, 8/27, 8/28に各日約9時間程度実施した. 8/30に機材を撤収したところ, 当日に非常に激しい雷雨が首都圏で起こったことから, 急遽, 富士山山頂からこの原因となった雷雲と雷放電の撮影を山頂班に依頼し, 携帯電話のカメラ(23フレーム/秒)で撮影してもらった. その結果, 多くの雷放電と親雲の観測に加えて, 富士山山頂からは初めてとなる2事例のブルースターターのカラー撮影に成功した(図2).

3. ブルースターターの親雷雲と放電分布



図1 長時間観測が可能な小型4Kカメラシステム

2021/8/30に富士山山頂から撮影されたブルースターターは携帯電話のカメラで撮影され, 正確な発生時刻は, 不明であるものの19:40~1950JSTの間に撮影されたことが分かっている. また, 19:30~1940JSTの間, 東京都内からも多数のブルースターターが観測されており, 富士山山頂で観測されたブルースターターの親雷雲は都内で観測されたブルースターターと同じ親雷雲が発生させたものと考えられることから, この情報を参考に親雷雲と放電分布について, 気象庁レーダー及びLiDEN, 防災科研LMA(Lightning Mapping Array), Blitzortung.orgの落雷位置データを使い, 親雷雲と雷放電の関係を求めた. なお, 我々のグループもBlitzortung.orgに参加しており, 捕捉率を上げるために今期は御殿場, 太郎坊, 旧富士山測候所に雷放電センサを増設している.

4. 解析結果

(1)ブルースターター

富士山から撮影されたブルースターターは2事例であったが, 都内からは10:30~10:40UTCの間に15事例のブルースターターが観測された. ブルースターターの正確な発生時刻と発生方位角はこの情報を使用した. 都内で撮影された動画データは, NTPで5分毎に規正され, 少なくとも1s

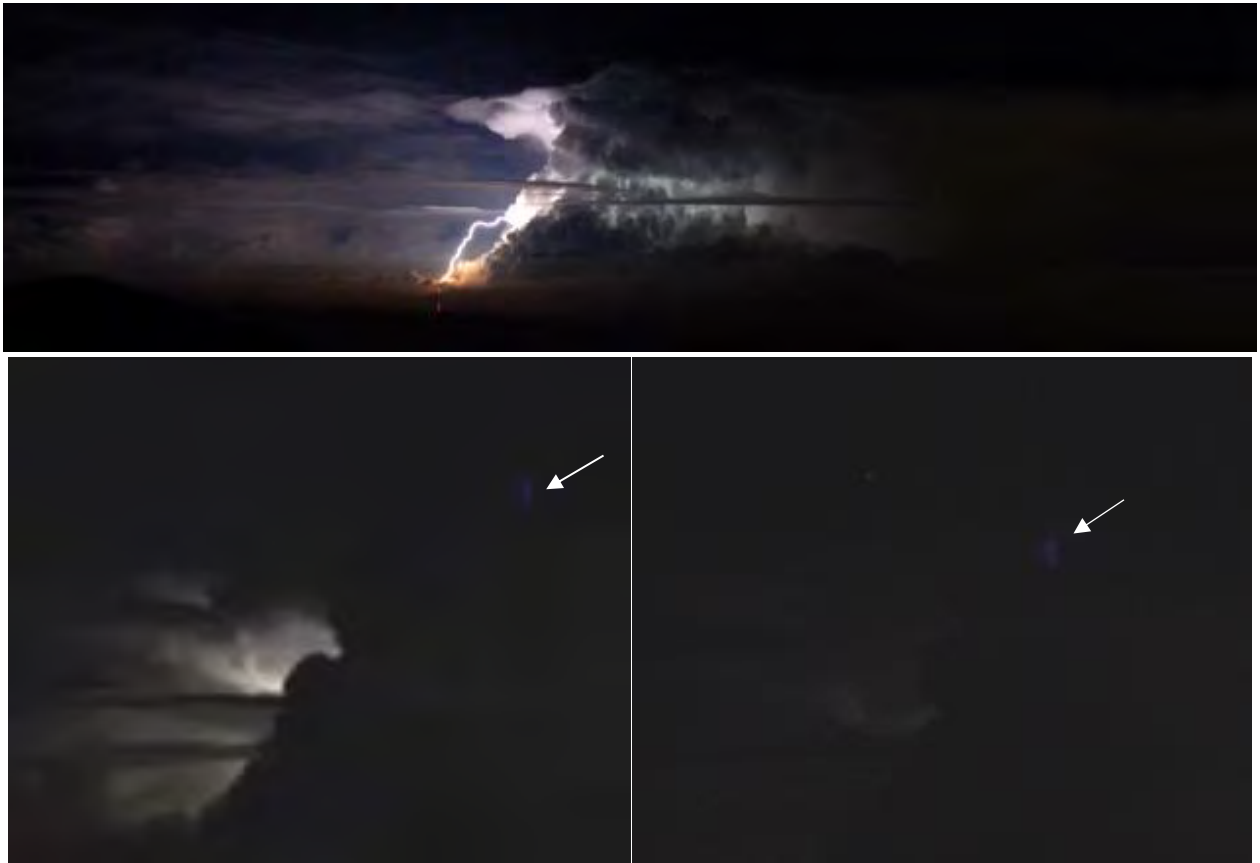


図2 2021/8/30 19時台に富士山から観測された雷放電（上）とブルースターターの拡大図（下）。白矢印はブルースターターを示す。

程度の時刻精度を有している。ここでは、10:37:54 (641ms) UTC に発生した、この日最も明るかったブルースターターの事例解析を行った。

(2) ブルースターターを発生させた親雷雲

図3にブルースターターを発生させた時刻の高度2kmのレーダーエコーとその期間のBlitzortung.org落雷分布(左図)及びLiDENの落雷分布(右図)を示す。富士山山頂及び都内から撮影した動画から、ブルースターターは、南側の雷雲エコーによって発生しており、ブルースターターが出現していた期間では、ほとんどの落雷がこのエコー域に集中していた。ここでは、雷雲エコーの発達を図は示さないが、ブルースターターの親雷雲は、発生当初1つのエコーであったものが、その後分裂したスプリッティングストームで、南側のエコーが東進しながらより発達し、ブルースターターを発生させていたことが分かった。なお、北側のエコーについては、東北東進した。落雷極性の解析から、落雷の大部分が負極性落雷であった。両雷位置標定システムを比較すると、エコー域内に落雷が集中している点は同じであるが、LiDENの方が、エコー周辺の落雷をより多く標定していた。次に、この雷雲の落雷の時系列に注目した。

(3) Blitzortung.orgとLiDENによる落雷時系列

図4にブルースターターを発生させた親雷雲のBlitzortung.orgとLiDENによる落雷時系列について示す。この図は、親雷雲がブルースターターを発生させた時刻の前後1時間、かつ親雷雲を含む移動経路内(36.1-36.4N, 138-140.2E)の総数を示している。棒グラフ内の数字は、落雷数を示し、数字の色は棒グラフの色と対応している。なお、LiDENは、総数落雷に加えて、落雷のうち推定電流値の絶対値が大きい(ここでは絶対値10kA以上と設定)事例のみの落雷時系列も示した。

ブルースターターが発生した時間帯に、Blitzortung.orgの落雷数(灰色)はピークを迎えていた(落雷極性及び電流値の推定はされていない)。LiDENの落雷数(赤色)では、ブルースターターの発生に少し遅れてピークを迎える一方で、1120UTC頃にそれよりも大きなピークを持っていた。絶対値10kA以上の落雷数(薄紫色)は、ブルースターターの発生した時間帯にピークを迎えたものの、11:20UTC頃のピークは緩やかであった。両者の比較から、LiDENでは、推定電流値の小さな落雷まで標定しているのに対して、Blitzortung.orgは比較的大きな雷放電を標定していることが示唆された。なお、ブルースターターを発生させたBlitzortung.orgの標定した親雷雲の落雷の捕捉率は、

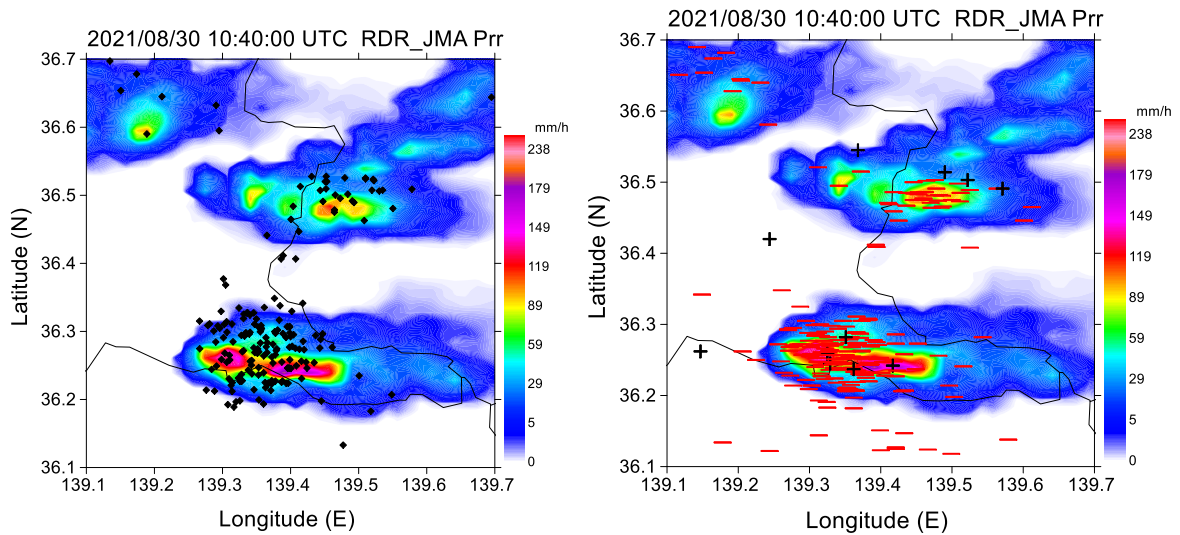


図3 ブルースターターを発生させた親雷雲と落雷分布

Blitzortung.org の落雷分布 (左) と LiDEN の落雷分布 (右). LiDEN の落雷分布のうち赤の「-」は負極性、黒の「+」は正極性落雷を示す.

LiDEN に対して、最大約 8 割, 最小約 1 割程度であった.

(4) ブルースターター, LMA 及びレーダーエコーの対応

図 5 に 10:37:54UTC のブルージェットが発生した時間帯の LMA の放電位置, レーダーエコー, 都内から撮影された画像から求めたブルースターターの位置を重ねたものである. 上図は親雷雲の中心線の北緯 37.245 度に沿ったレーダーエコーの RHI 断面に, 都内で撮影された光学観測から求めた方位角仰角から求めた位置と高度(鉛直の黒線)を, また, 防災科研の LMA の雷放電位置を緯度・高度断面に投影した図である. LMA 凡例の放電時刻は 10:30UTC からの経過秒で示している. ブルースターター発生時刻と近い放電点は, 時系列順に緑, 赤, 黄丸にしている. 放電路の鉛直分布から, ブルースターターの原因となった電荷は, 高度 10km 以上に位置していた. また, 高度 17km 付近に放電位置が標定されており, ブルースターターの発生位置・時刻と非常に近いことからブルースターターと関連する放電であることが示唆された. エコーの鉛直構造を見ると, 非常にエコー強度の強い領域が高度 10km 以上まで達しており, その下方ではエコー強度の弱い vault 構造が見られた.

下図は, 親雷雲の高度 2km のエコー強度に, ブルースターターの位置を RHI 断面に投影した時の位置と LMA で標定された雷放電位置の水平分布を示している. ブルースターターの水平位置を, 光学観測から求めたブルースターターの方位角(実線)と RHI 断面(破線)の緯度との交点に×印で示している. また, 最も高度の高い LMA の放電点標定位置を赤色のひし形で示している. ブルースターターと関連する放電は, エコー強度の非常に強い領域に集中していた. また, 水平構造を見ると西端付近には不明瞭ながらフック状

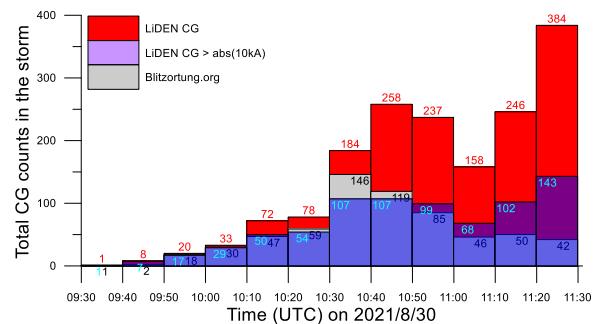


図4 親雷雲が発生させた落雷数の時系列

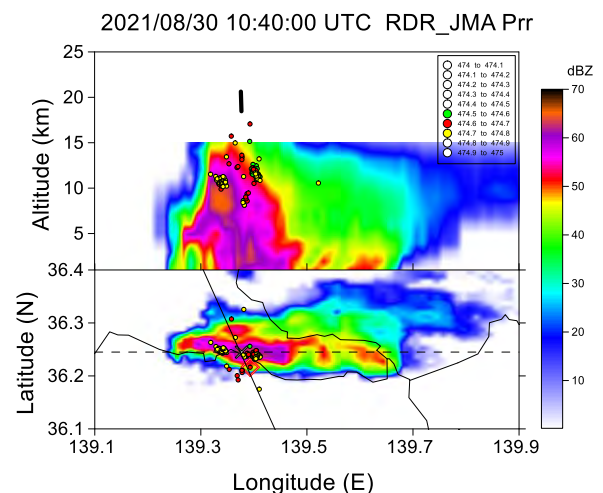


図5 10:30:54UTCに発生したブルースターター, LMA, 親雷雲の鉛直エコー断面 (上図) 及び高度 2km の水平エコー分布 (下図)

の構造が見られた. エコーの水平及び鉛直構造から, この雷雲エコーはスーパーセルに見られる構造を持っていた.

なお、ブルースターターの位置を RHI の投影位置と対応するように表示したが、LMA で最も高い高度に標定された放電点の位置にブルースターターが発生したとすると、ブルースターターの水平位置は、エコーの南端の赤色のひし形付近に移動することになる。

5. まとめ

2021 年の富士山からの高高度放電発光現象の観測及び解析結果から下記のことが明らかとなった。

- (1) 富士山からの光学観測
 - 2 事例のブルースターターのカラー動画観測に成功した。
- (2) ブルースターターの親雷雲
 - ・ スプリッティングストーム(分裂する雷雲)であった。
 - ・ ブルースターターの親雷雲は、分裂後、より発達した南側の雷雲であった。
 - ・ Vault やフックエコーの存在から、親雷雲エコーはスーパーセルに見られる特徴を有していた。
- (3) ブルースターターと関連する放電
 - ・ LMA により、ブルースターターと関連する放電と示唆される放電がブルースターターの発生方位角の雲頂付近に標定された。
- (4) Blitzortung.org と LiDEN の比較
 - ・ Blitzortung.org の捕捉率は、特定の雷雲に関して、LiDEN の標定した全落雷との比較で、最大 8 割、最小 1 割程度であった。
 - ・ LiDEN の $\pm 10\text{kA}$ 以上もしくは以下の推定電流値を持つ事例に限って言えば、Blitzortung.org と LiDEN は、ほぼ同程度の捕捉率であった。
 - ・ 両落雷位置標定システムの比較(4)(5)から、両システムの相対的な標定特性の一端が明らかとなった。

謝辞

ブルースターターの動画は、NPO 法人「富士山測候所を活用する会」山頂班 岩崎洋班長から提供を受けました。落雷位置データは Blitzortung.org から提供を受けました。レーダーエコー等のデータは、気象研究コンソーシアムより提供を受けました。本研究は JSPS 科研費 20H02419「富士山頂高度を活用した落雷減災のための多角的雷研究」の助成を受けました。また、NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれました。ここに、関係者の皆様に深謝いたします。

富士山体を検出器にした 2021 年夏期の雷現象観測と今後の指針

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 伊高健治³, 鈴木智幸², 林真彦¹, 土器屋由紀子¹

1.富士山環境研究センター, 2.静岡県立大学, 3.弘前大学

1. はじめに

富士山測候所(以下, 測候所)は, 気象庁が常駐観測を止め無人化した後, NPO 法人富士山測候所を活用する会が一部を借用して夏期に研究活動に利用している. 研究内容には温暖化の気候問題で注目を集めている CO₂ 観測など継続性が求められる観測が多く, 測候所落雷による観測中断は, 常時滞在できず速やかな対応ができないなど, 研究上大きな障害になる. このような共同研究に供する測候所雷対策のため, 2011 年に電源・接地線の配線状態, および建物導電性構造体の接続状態調査を行なった. 被保護観測系に雷サージが侵入する多くが, 観測系が①一点接地構成になっていないことと②接地系統に雷電流が流れて接地系統に生じる電圧降下と共通接地極に繋がる電源電圧との間のサージ電圧であることを明らかにし, その対策を各庁舎の鉄骨基礎部等の未対策部に実施している. 等電位接続の強化による統合接地化(理想的にはファラデーケージ)と絶縁(耐雷)トランスの導入になる.

この雷対策のため, 電源・接地線の配線状態調査で, 富士山頂にある測候所の電源は図1に示すように山麓より高压ケーブルを埋設して引き込み, また接地線は山麓に繋がっていることがわかった. 高压ケーブル内電源線



図1 測候所接地線電流測定箇所(■), 埋設高压ケーブル・接地線, 及び接地箇所

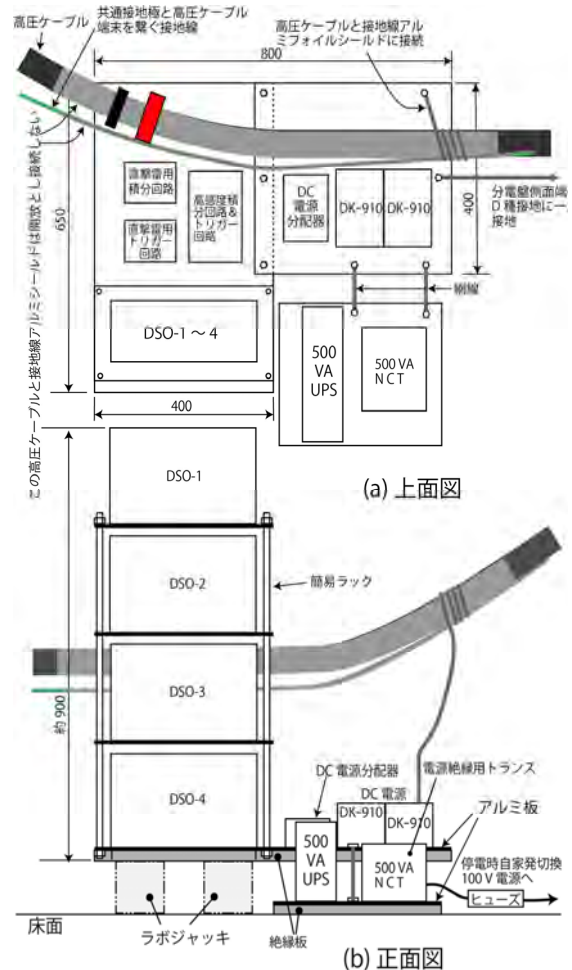


図2 接地線電流測定系外観図

には電源電流が流れるが, 正常な場合, 高压ケーブルに流れる電源電流は見かけ上無い. このことから高压ケーブル内接地線に流れる測候所直撃雷電流の測定が可能でないかと 2012 年に接地線を内蔵する高压ケーブルに流れる電流をログウスキーコイル電流計で測定した. この期間測候所に直撃雷は無く, 測定できなかったが, 代わって周辺の雷現象による電流が観測された. このことから 2013 年以降は直撃雷だけでなく周辺の雷現象により流れる電流にも注目し測定できるように改良して測定している. 山体上接地線を利用した雷現象測定器を生み出す切っ掛けになった. 図2は 2021 年夏期に測候所に設置した接地線電流測定系外観図である. この測定系は, 雷現象により図 1 に示す測候所と山麓を繋ぐ接地線に流れる電流を測定する, 富士山体を検出器にした雷現象観

測器になっている。

本報告は開発したこの雷現象測定系による 2021 年度夏期観測期間に得られた成果を報告すると共に測定上の問題点とその解決策、及び今後の指針についてまとめた。

2. 測定原理

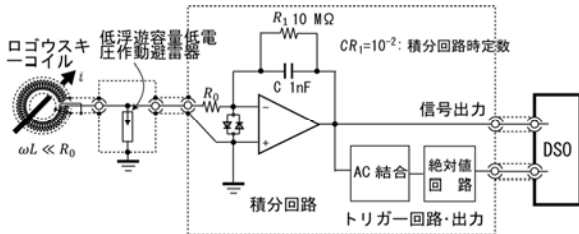


図3 高圧ケーブル内接地線電流測定用ログウスキーコイルの基本回路

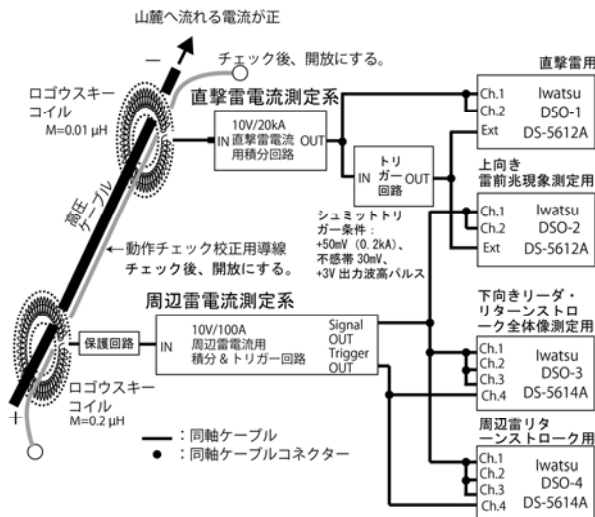


図4 2021 年度夏期測定に使用した測定系

雷現象によって山頂の富士山測候所と山麓の接地極を結ぶ接地線に電流が流れる。この電流の一部が高圧ケーブル内接地線に流れる。この電流をログウスキーコイルで検出する。基本回路は図3に示す構成になっている。

図4は富士山に生じる雷現象を反映測定できるようにした測定系である。DSO-1は直撃雷を測定する。DSO-2は直撃雷が上向き雷の場合に現れる約 1 s の長時間の前兆現象を測定可能にする。DSO-3 はステップリーダ前兆現象とリターンストローク全体像を測定する。DSO-4 は周辺雷リターンストローク用である。富士山周辺の雷現象により流れる接地線電流が捉えられるようにしている。

今までの測定結果を整理解析し、接地線に電流を流す雷現象として、図5に示す5点の現象が分かっている。(1) 直撃雷電流、(2)電磁誘導電流、(3)測候所電極捕集電流、(4)静電誘導電流、および(5)山麓からの逆流電

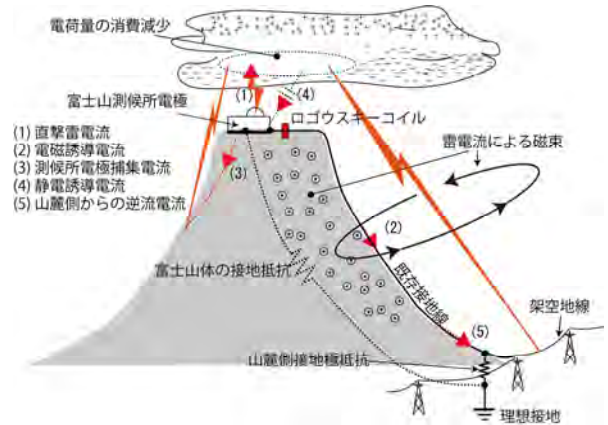


図5 富士山の山体と接地線による回路及び雷現象時の接地線電流負極性雷を仮定したときの電流(→)の流れ

流、になる。富士山体を検出器に利用した本測定系は、富士山周辺の雷現象のみならず接地線に電流を流すことになる自然界や生活圏の電磁環境にも強力な測定手段になると考えている。例えば高高度放電現象の電磁誘導電流や太陽フレアなどによる送電線架空地線の電位変化による逆流電流も、直流・低周波域の電流測定を可能にすることで、測定可能になるのではないかと推測している。ログウスキーコイルは磁束変化に感応するため、遅い変化に対して感度は小さくなる。これを補うため、接地線電流が作る磁束に変調を加えられるようにすることで変動が小さくとも直流域まで高感度な測定を可能にし、接地線に電流を流す現象の測定の幅を広げることが可能になる。

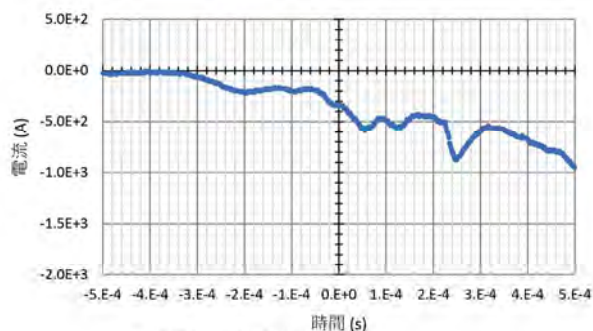
3. 測定結果および考察

昨年 2021 年 7、8 月の夏期観測では直撃雷が観測され、また多数の観測結果が得られた。

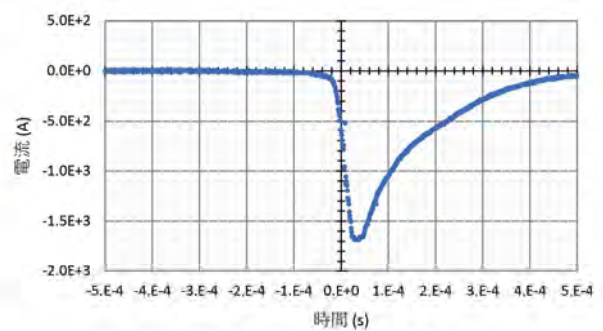
8 月 18 日に図6に示す二つの直撃雷が観測された。最初に(1) 測候所の第1雷撃があり、その 1 秒後に(2) 測候所の第2雷撃が観測された。(a)がそれぞれ測定した接地線電流で、(b)がそれを数値積分した電荷量になる。直撃雷電流は校正値を2として、第 1 雷撃が 2 kA 以上、第2雷撃が 3.4 kA と推測される。最初の直撃雷にはステップリーダと上向きリーダ共に観測されておらず、電流極性は負極性上向きリーダと同じ極性の電流が測定されている。他の測定でも大きな電流の前兆現象が見られていることから、この測定された第1雷撃が大電流の上向きリーダであった可能性が高いと考えている。今後の測定で再現され明確になるものと考えている。なお、時刻校正はしており、誤差は±2 s である。

LIDEN 等の落雷情報によると同時刻の測候所位置に 3 回の落雷を観測しており、本測定系の観測したものは三重雷の第 1 雷撃と第3雷撃と推測される。

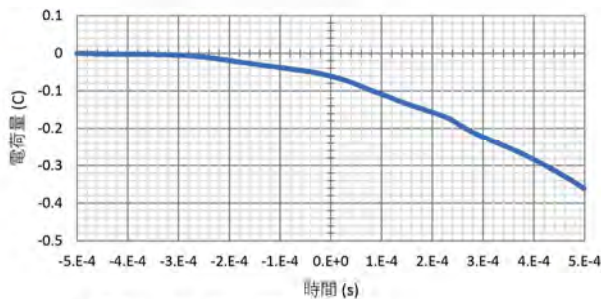
図7はデジタルストレージオシロ(以下、DSO)DSO-3 の



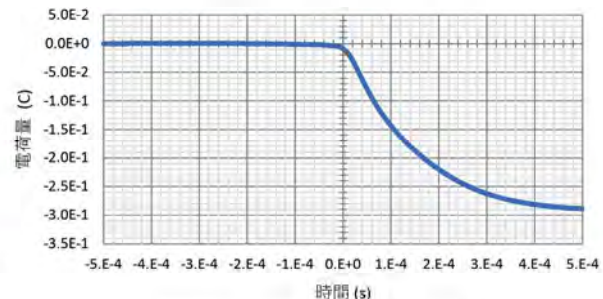
(a) 高圧ケーブル内接地線電流



(a) 高圧ケーブル内接地線電流



(b) 高圧ケーブル内接地線電流の数値積分



(b) 高圧ケーブル内接地線電流の数値積分

(1) 測候所の第1雷撃 (at 10:46:28 on August 18, 2021)

(2) 測候所の第2雷撃 (at 10:46:29 on August 18, 2021)

図6 2021年8月18日10時46分に観測された測候所直撃雷

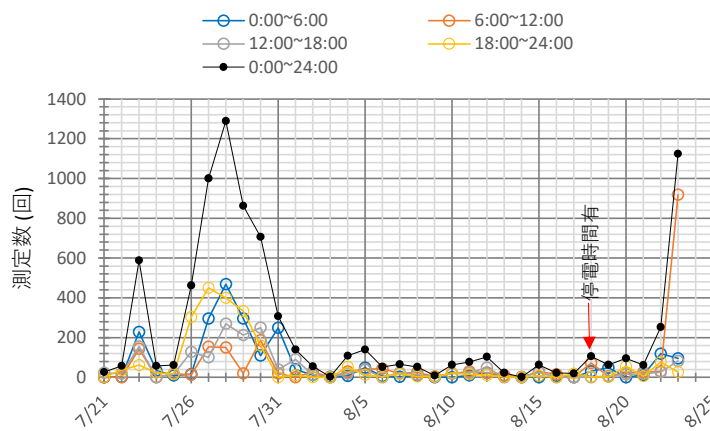


図7 接地線電流測定数(2021年). 8/18は停電で少ない.

各測定日の接地線電流の測定回数である。当然であるが、周囲の落雷状況との相関は高くなっている。測候所直撃雷を観測した8月18日は、停電で測定できない時間帯が生じており、観測数は少なくなっている。この図は、測定時間を100msにしたDSO-3によるもので全測定回数は7000回超え、測定時間を2msにしたDSO-4では11000回を超えている。いずれもマニュアル処理ができない測定回数であり、解析ターゲットを絞り込んでデータ処理をする必要がある。なお、前者のDSO-3は前兆現象のリーダと引き続き生じるリターンストロークの全体像

を測定可能にするため、測定時間を100msに拡大したものである。

多数の測定波形から落雷まで至らない小さな雲放電が盛んに生じており、多くが落雷まで発達せずに消滅していると考えられる。その他にも興味ある測定結果が多く得られている。観測結果はまだ解析中であるが、富士山は単独峰で、富士山測候所は山頂の剣が峰にあり、高所で雷雲が近いこと、レンズ状の電場形成、および気流変化などによる影響が接地線測定電流に現れている。今後の継続した測定により富士山特有の雷現象が解明できるのではないかと期待している。

4. 問題点と今後の指針

今までの測定で明らかになった問題点とその対策と指針について以下にまとめた。

4-1. 仮設避雷針の実現

測候所への直撃雷は、上向き雷の頻度が高い可能性がある。2015年に観測された負極性直撃雷は上向き雷の前兆現象が測定され、昨年測定された直撃雷も上向き雷が観測されたものと推測される。

当初、測候所が山頂にあることと接地線が山麓に繋がって

いることで測候所の落雷頻度は、高くなることを予想していたが、測候所への高い落雷頻度にはなっていないようである。これは、山頂の落雷は増えても、上向き雷、下向き雷の落雷の仕方によるものでないかと推測している。例えば上向き雷の場合、落雷位置は、上向きリーダの発生個所が落雷位置になる。もしそれが測候所であれば、落雷位置は測候所になる。しかし、下向き雷の場合、リーダの進展は周囲の電界の影響を受けて進むため、落雷位置は周辺に分散したものになり必ずしも測候所にならない。一方、測候所直撃雷頻度は、測候所からの上向き雷の発生条件を整えることで増加させることになるかと推測している。具体的には高電界を発生し易い位置に仮設避雷針を設けることで、仮設避雷針先端にさらに高電界が得られ上向き雷リーダを発生し易くでき、直撃雷の落雷位置を測候所とすることができると考えている。雷対策等の直撃雷を期待する研究にとっても、好ましい研究環境が得られ、研究の進展が期待できるようになると考えている。また本測定系の校正値は、測候所被雷電流と本測定系測定電流との比を取ることで求められる。仮設避雷針被雷電流の絶対測定を可能にすることで校正値が求められることになる。

仮設避雷針は、当初、一番高位置にある観測塔のみに設けることで測候所を代表する高電界が得られる場所になると考えていたが、昨年の被雷個所は、ビデオ撮影場所から光と音で推測された位置は、第3号庁舎の西側にある水槽付近と推測され雷雲の位置によっては富士山の測候所位置を反映して北端に高電界発生位置が生じることも推測される。この場合、北端にも仮設避雷針が必要になる。

仮設避雷針は、4-4 に示す方法で被雷電流の絶対測定も可能なようにシャント一体型にする必要がある。シャントにより測定することで直接シャントの出力電圧をDSOで測定可能になる。簡略な測定系が可能になる。

4-2. 観測上の障害の除去(雷対策)

本測定の見切りは、雷対策の調査で高圧ケーブルが接地線を内蔵し、山麓に繋がっていることが分かったことである。雷対策の問題点調査では接地系統の脆弱個所が分かり対策を実施している。

(1) 等電位性の強化

測候所の雷対策として各庁舎の基礎鉄骨の電氣的接続を強化しており、建物の等電位性を高めている。このことが2021年被雷してもノイズトラブル事例が無かった原因と考えられる。基礎鉄骨抵抗率は非常に小さく、高い等電位性が得られる。2012年以前に西から観測塔、第2号庁舎、第4号庁舎、および仮設庁舎それぞれの基礎鉄骨の電氣的接続は強化された。2013年には西端の水槽鉄骨、第3号庁舎、および第2号庁舎の基礎鉄骨の電氣的接続が強化された。以上の結果から測候所全体の等電位性は非常に高いものになっていると推測される。

(2) 接地電位差対策

しかし雷電流が流れることによる電圧降下により電位差は生じ、その電位差が共通接地極と観測機器設置場所との間に生じる。各所にある電源盤のB種接地電源線の接地電位は共通接地極電位になるため、観測場所での電源のB種接地極(共通接地極)電位と観測場所の接地電位との間には導電性建物構造体に流れる雷電流の電圧降下が加わることになる。観測機器設置場所でこれがサージとして侵入して誤動作の原因になる。これは、一般的にもサージ侵入事例として多く生じている。従って、第4号庁舎付近にある共通接地極から離れた位置にある庁舎、例えば第3号庁舎の電源は絶縁変圧器(できれば耐雷変圧器)を介して利用する必要がある。測定系共通の接地極を確保し一点接地とし、電源も絶縁変圧器を介することで電源と接地との間からのサージ電圧の侵入を防止できる。

(3) 第1号庁舎の雷対策

第1号庁舎の基礎は、接地系統の電氣的接続状態の調査当初鉄骨と考えていたが一部木造によるものになっている。第1号庁舎の接地線で火花が出たこと、また屋内で髪の毛が逆立つことがあったことを伝聞情報で聞いているが、これは庁舎の屋根・壁等外装材電気導体の電氣的接続が良好で無かったこと、この第1号庁舎の建物構造が木造であることが原因になっているものと考えられる。共通接地極に繋がる良好な接地系統を確保すること、電源と接地との間からのサージ電圧侵入を防ぐため、電源は絶縁変圧器を介して使用する必要がある。このとき過電流安全対策のため、変圧器の過電流保護器として適切な保護容量のブレーカやヒューズを用いて使用する必要がある。

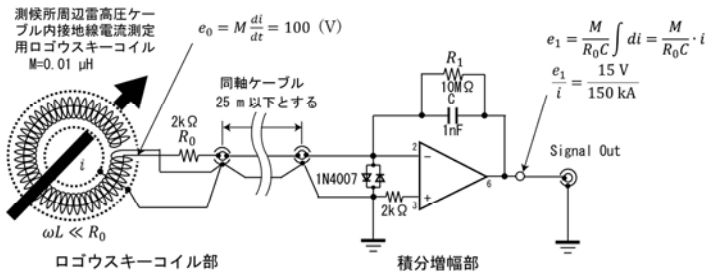
4-3. できるだけ正確な時刻校正の実現

正確な時刻は他の現象と比較するため非常に重要である。今までの時間校正はDSOの内臓クロックを測定系設置測定前にJST時刻に合わせ、測定終了後に各DSOのJSTとの時間差から内挿校正値を求め補正していた。この誤差は $\pm 1 \sim 2$ s以内になると推測している。これをできるだけ小さくしたい。

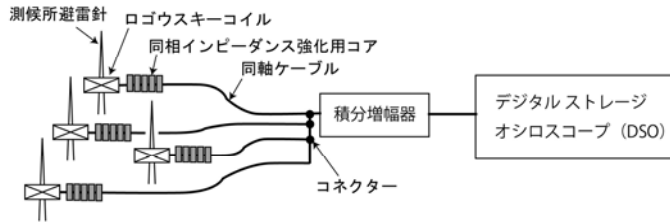
DSOのクロック基準は水晶振動子を採用している。この温度係数による温度変化で生じる誤差は観測上無視できない。DSOが使用中であればある程度の一定の温度を確保でき、水晶振動子のクロック変化を小さくできるが、最初に時刻合わせをしてから測定終了後に時間のずれを確認するまでの設置測定期間が短く、休止期間が長くなった場合、無視できない影響を受けることになる。こうしたことの影響が受けにくい校正方法にする必要がある。

このDSOの使用方法は、本測定系が求める正確度・精度に無視できない温度変化を与えている可能性がある。解決方法は正確なクロックを導入することであるが費用や測定系への導入手続きを考えると簡単ではない。

満足できる校正を可能にする方法として、DSOの時刻表示をGPS時刻補正カメラで、DSOの秒単位の時刻表示画面を

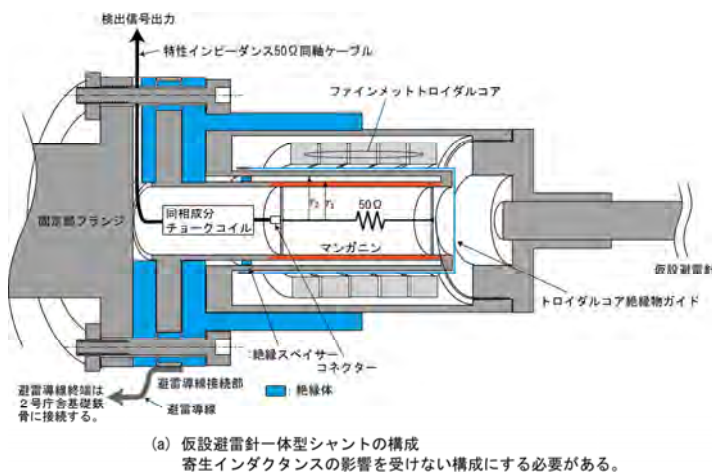


(a) 直撃雷電流測定用ロゴウスキーコイル電流計基本回路

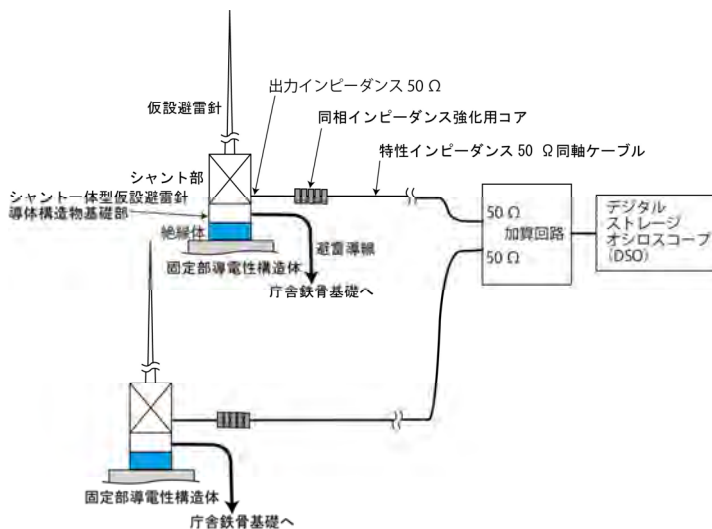


(b) 複数避雷針被雷電流の一括測定方法

図8 ロゴウスキーコイルによる避雷針電流一括測定方法



(a) 仮設避雷針一体型シャントの構成
寄生インダクタンスの影響を受けない構成にする必要がある。



(b) シャント一体型仮設避雷針のシャント出力加算回路構成

図9 仮設避雷針一体型シャントの構成と加算回路の構成

撮影した時の時刻補正カメラの時刻がわかるようにして、できるだけ短い期間(1週間以下)で各 DSO 時刻表示画面をできるだけ多く撮影することで測定使用と休止を含めて使用方法に関係しない精度・正確度の高い時間補正が可能になる。秒単位まで時刻表示ができる GPS 時刻補正カメラは、O 社製カメラで可能である。GPS 信号を捉えることができる条件、即ち屋外で補正して使用する必要がある。こうすることで高正確度の補正が可能になる。

GPS 時刻補正カメラは少なくとも秒単位まで記録可能なものにする必要がある。また使用時は、GPS による時刻補正がされたことを確認することも必要である。

4-4. 被雷電流の測定方法

4-4-1. 被雷個所を一個所にできない場合

測候所にある避雷針のどこに落雷するか分からない場合、図8のように各避雷針にロゴウスキーコイルを設け、各避雷針の和電流を測定できるようにして、どの避雷針に落雷しても被雷電流を測定できるようにする方法である。下向き雷のように分散し、被雷個所を一個所の避雷針にできない場合に有効である。測定系は簡略できるものの複雑であり維持保守上で難点がある。被雷電流が他の避雷針に分流することは無いため、個々の避雷針に測定系を設ける必要はなくなる。難点はどの避雷針に被雷したものか分からなくなることである。しかし、多数のロゴウスキーコイルに一つの積分回路で済むメリットは大きい。

4-4-2. 富士山測候所への落雷が決まる場合

もし上向き雷の上向きリーダの発生個所が決める場合、図9に示すシャント一体型の仮設避雷針とすることで正確な電流測定が、簡易な測定系、即ち DSO だけで実現可能になる。測候所の高電界位置にさらに高電界が得られる仮設避雷針を設けて上向き雷を発生し易くすることで実現可能になる。この高電界発生位置候補としては観測塔の頂点が考えられる。2021年8月18日の上向き雷と推測される直撃雷では、光と音の到達時間差から、北端の水槽位置との指摘もある。北側の縁位置にあり雷雲によっては高電界が生じる位置になっていると考えられ、この場所も候補として考えられる。

仮設避雷針一体型シャントは図9(a)に示す構成になる。シャントは温度係数の小さなマンガン(赤色部)の既知抵抗の電圧降下を測定できるようにしたもので、線路のインダクタンスは図9(a)のように構成することでマンガン部のインダクタンスを小さく無視できるようにしたものである。これは線路

の往路と復路で生じるインダクタンスが同じになるようにして相殺できるようにしたものである。理想的には既知抵抗電圧降下のみになるため、電流の絶対測定が可能になる。

被雷電流は、設置場所の構造体に接続するのではなく、避雷導線により低インピーダンスが得られる接地系統になる庁舎建物基礎鉄骨に直接接続することで避雷針設置場所の電圧降下は無いため周囲への影響は小さくできるようになる。

複数の仮設避雷針を設ける場合、図9(b)のように加算回路を入れることで1台のDSOで被雷電流を測定できる。

4-5. データ処理方法

DSO-1とDSO-2の測定数は少なく、興味あるデータになるのでそれぞれマニュアルのデータ処理が適切である。

DSO-3とDSO-4の取得データは多量になるため、マニュアル的なデータ処理でなく自動的なデータ処理の導入が必要である。しかし、中には興味ある測定結果が見られる場合、詳細な分析ができるマニュアル処理が必要になる。

以下は自動的データ処理に必要な手順となる。

- (1) 全データのDSOから得たWFMデータのCSVデータへの変換
- (2) 全データの時刻校正
- (3) データ処理対象データ:DSO-3, DSO-4
- (4) 測定レンジの選択:①飽和していないで最大振幅が収まる。②最大振幅が小さく収まり、一方飽和しているが大半の振幅が収まり分解能を高めることができるとき二つのレンジを使用する。
- (5) 電流への換算:設計条件からログウスキーコイルの出力電圧に換算係数(電流/電圧)との積から接地線電流を求める。
- (6) オフセットの除去:測定時間幅の最初の4/10,あるいは2/10の区間平均値を全体から差し引く。
- (7) ノイズ除去:①簡易に行う1方法として、電源からの零相電流ノイズは、20msの電源周期から、この最初の20msの測定値を反転した信号を他の周期にも加えて相殺させる方法がある。
- (8) 有意な信号か:振幅の大きさは一定値以上か。
- (9) 電流の数値積分:移動電荷量
- (10) 必要データの収集・整理:測定数, 電流最大値, 先行極性, LLS情報との照合, 放電時間幅, 等
- (11) グラフの作成:接地線電流変化, 移動電荷量変化

4-6. 測定系の一体化とその他の対策

測定系は観測期間に持ち込み設置し、終了するとばらして撤去することになる。そのため設置と撤去に手間がかからず安定した測定が得られるように、できるだけ一体化し、構成部品を少なくすることが望ましい。

その他の対策として以下のものがある。

(1) オフセット対策

2021年夏期測定では高感度増幅器のオフセットが大きくなり、信号振幅を加えると測定レンジによってはデジタルオシロ

スコープの電圧測定範囲を超えてしまう状態になっていた。電圧測定範囲に収まるAC結合の高感度レンジの信号のみが全体信号を測定可能にしていた。このため、当然、±全振幅の測定範囲は小さくなるため、測定可能な信号電圧は小さくなっていた。

増幅器のオフセットは、測候所に持ち込む前に富士山環境研究センターでゼロに調整している。オフセットの変動は、測候所への搬入時の振動により生じたものと推測される。この振動対策は新しい回路で組み直すあるいは半田付けで組み直すことで接続抵抗変化によるオフセット変化が生じ難くすることである。静電誘導電流変化は、雷雲電荷変化の影響を受け、ドリフト変化を測定することになる高感度測定レンジは影響を受けやすい。

よくわかっている人が対応することを仮定して、十分なアニーリング後(電源を入れて1時間以上置いて)増幅器ケース外部から容易に調整可能にする方法を採用してもよい。

(2) DSOの最大記録数対策

DSOの最大記録数は10000回を超えると最初に戻り書きされるようになっていく。DSO-4の2021年の測定数は、上限の10000回を超えていた。この対策としてはトリガーレベルを高くして測定数を少なくする。あるいは、10000回を超えない期間で記録USBメモリーを交換する必要がある。

(3) デッドタイム対策

測定器各DSOは測定結果をUSBメモリーに記録する。この記録時間中は測定できず、デッドタイムになる。この記録時間中は別のDSOが測定可能にすることでデッドタイムを無くすることができる。

(4) 測定系停電対策

本測定系は、雷襲来時等の高圧電源遮断時は自家発電電源を使用するようになっていく。本測定系の電源部にUPSが使用されており、この切替中停電しないようにしている。UPSのバッテリー容量が十分でないためか、この切替操作時に測定系の停電が発生している。この防止のため、UPSは十分バッテリー容量の大きなものにする必要がある。

4-7. 今後の指針

接地線電流測定を実施する上での今後の指針として以下のことを実現していくことが求められる。

(1) 接地線電流の校正値を求める

仮設避雷針と雷電流絶対測定用シャントを実現し、仮設避雷針に落雷させることで可能になる。

(2) 山麓側接地線電流の測定を可能にする

逆流電流の定量的評価ができる。山麓側の現象によるものか評価ができる。

(3) 山麓側接地抵抗を求める

山麓側接地抵抗が評価可能になるとそこを流れる電流によって接地線電位が求まり、接地線電流から測候所の接地抵抗が求まる。

(4) 測候所の接地抵抗

測候所の接地電位は山麓側接地極電位と同じになるため、その電位を接地線電流を校正し求めた正確な接地線電流で除すことで測候所の接地抵抗を求めることができる。

(5) ノイズの少ない状態での測定の実現

高圧電源遮断時は零相電流の影響は現れない。従って、もし、太陽光発電や自家発電等の山麓からの高圧電源に頼らない電源が確保できると零相電流の影響を受けない質の高い測定が可能になる。もし将来的に測候所と山麓を繋ぐ接地線1本のみでできると接地線電流校正の必要は無くなり、さらに質の高い測定が可能になる。

(6) 直流域までの測定を可能にする工夫

直流に対し高感度な磁場計を使用する方法もあるが、雷電流が流れた時の大きな磁場により測定器破損の可能性がある。大電流に耐えられ、高感度測定が可能な測定器が必要である。その候補として磁場変調型ログウスキーコイルが相応しいと考えられ、開発を進めるべきである。

接地線電流測定は、直流域まで測定可能にすることで雷現象を含めた自然現象による直流域までの接地線電流測定が可能になる。また電流測定から測候所電界の変化を測定可能になり、フィールドミル電界測定器と併用することで直流から使用高周波域までの電界測定が可能になる。

(7) 通年観測を可能にする

測候所にも太陽光発電や燃料電池等の電源を確保できれば、高圧電源を使用せずノイズの小さな測定が可能になる。測定系も長時間測定が可能でシステムに全面的に改良変更することが必要になる。落雷現象以外の測定が可能になると考えられる。

5. おわりに

2021年はコロナ禍であったが、約40日の測定ができた。この間、多重雷の直撃雷が観測できた。また多数の雷現象が測定できた。

第1雷撃に前兆現象は見られず、第1雷撃が大きな上向きリーダの可能性が高い。大きな前兆現象は観測されており、特に富士山のように雷雲が近くなることによる特有の現象の可能性もある。今後の観測で明確になる。

観測された多数の雷現象は、富士山特有の雷現象を明らかにすると推測される。また、今後の観測で富士山特有の雷現象が解明されるようになって考えている。本測定系は、まだ洗練させる必要があるが、雷現象観測に強力な測定手段になっていることが示された。

今までの測定によりわかった問題点と将来実現させるべき課題は以下ようになる。測定系は、今後、対策を反映させ問題が無い状態に改良していく必要がある。

①仮設避雷針の実現、②観測上の雷障害の除去、③正確な時刻校正の実現、④測候所避雷電流の測定方法、⑤データ

の処理方法、⑥オフセット対策、⑦測定記録時に生じるデッドタイム対策、⑧零相電流ノイズ対策、⑨直流・低周波電流を測定可能にする工夫、⑩停電時電源補給対策

以上の問題点は、今後、継続して測定を進めていく上の改良すべき指針としてまとめた。

将来的に接地線電流は、直流域まで測定可能にすることで、雷現象も含んだ広範囲の自然現象により流れる接地線電流の測定が可能になる。また、電流測定が可能な接地線のみを残し電源は太陽光発電や風力発電、燃料電池発電にすることでノイズの小さな接地線電流測定が可能になる。またできれば通年測定にすることで、雷現象以外の自然現象も捉えることが可能になる。新たな現象の発見にもつながる可能性がある。

7. 謝辞

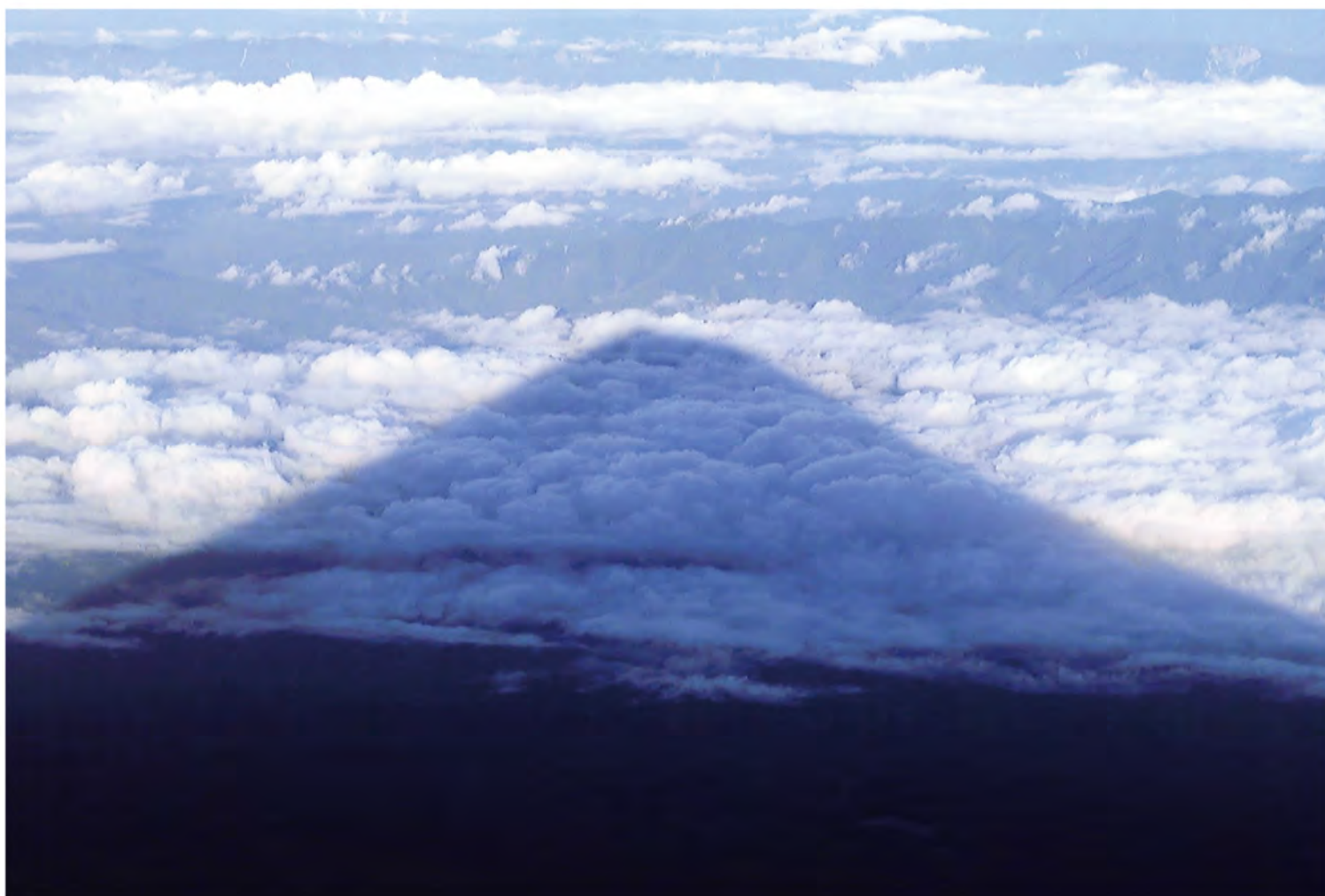
資料や情報提供等で調査にご協力頂いた東京管区気象台の各氏、雷観測にご協力頂いたNPO法人富士山測候所を活用する会の岩崎洋、大胡田智寿、山頂班および事務局員の方々、さらにDSO使用でご支援いただいた岩通計測、および落雷情報を提供して頂いた中電CTIのご厚意に感謝する。

なおこの研究は新技術振興渡辺記念会の受託研究費、および(財)トヨタ自動車株式会社のトヨタ環境活動助成プログラム助成「富士山測候所の被雷対策による温室効果ガス常時監視の実現」、JSPS 科研費 20H02419、およびWNI 気象文化創造センター「富士山体を活用した新しい手法の雷観測」の助成を受けた。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 中村安良, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2012). 富士山測候所雷対策適用上の調査と対策方法. 第5回(平成23年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 26-35.
- 2) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 中村安良, 大胡田智寿, 土器屋由紀子, 鴨川仁(2013). 富士山測候所の山麓からのケーブルに流れる雷観測電流. 第6回(平成24年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 14-27.
- 3) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2014). 富士山環境下での測候所雷対策と山麓への接地線電流測定の準備. 第7回(平成25年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 4-11.
- 4) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2015). 富士山候所の山麓への接地線電流観測と雷対策. 第8回(平成26

- 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 19-27.
- 5) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2016). 富士山候所導入高圧ケーブル内接地線電流観測結果と今後の観測方法・雷対策, 第 9 回(平成 27 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 16-25.
 - 6) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2017). 今後に求められる測候所接地線の落雷電流観測と雷対策, 第 10 回(平成 28 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 11-20.
 - 7) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2018). 富士山測候所の山麓に繋がる既存接地線を用いた雷現象検出器, 第 11 回(平成 29 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 22-30.
 - 8) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2019). 富士山体の既存接地線を用いた高感度雷現象検出器の開発, 第 12 回(平成 30 年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 20-29.
 - 9) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2020). 富士山体表面上接地線電流測定による雷現象観測装置の開発状況, 第 13 回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 15-23.
 - 10) 電気・電子機器の雷保護検討委員会(委員長横山 茂) (2011-8). 電気・電子機器の雷保護, 電気設備学会.
 - 11) 石井勝 (2013-9). 上向き雷放電, 第 31 回レーザーセンシングシンポジウム特別講演.
 - 12) 超高構造物における雷撃特性調査研究委員会(委員長石井勝) (2020 年 3 月). 東京スカイツリーで観測された落雷の特性, 電気設備学会誌, Vol.40, No.3, pp 198-202.
 - 13) 北川信一郎, 河崎善一郎, 三浦和彦, 道本光一郎 (1996). 大気電気学, 東海大学出版会.
 - 14) 北川信一郎 (2001 年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
 - 15) 高橋劭 (2009 年), 雷の科学, 東京大学出版会
 - 16) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2021). 富士山雷観測によるリーダの進展モデル, 第 14 回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 26-30.
 - 17) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2022). 富士山体上接地線電流による雷観測系, 電気学会 A 部門, Vol.142, No.3, 1-13 (印刷中)
 - 18) 安本 勝・佐々木一哉・鴨川 仁・大胡田智寿・土器屋由紀子(2020), 2019 年富士山測候所停電時接地線電流, 電気設備学会全国大会, F-11, pp.262-265
 - 19) 安本 勝・鴨川 仁・佐々木一哉・土器屋由紀子 (2020), 雷現象により富士山体表面上の接地線に流れる電流, 電気学会全国大会, 1-042, pp.53-54



第15回成果報告会講演予稿集

2022年3月5日発行

編集・発行：認定NPO法人富士山測候所を活用する会
〒169-0072 東京都新宿区大久保 2-5-5 中村ビル 2階
TEL：03-6273-9723 FAX：03-6273-9808
E-mail：tyo-ofc@npofuji3776.org

無断で転載または複製することを堅くお断りします