

第17回成果報告会

2007年 - 2023年 富士山測候所で行った活動の成果

講演予稿集



期日：2024年3月10日（日）12:45～17:30

会場：連合会館、Zoom

主催：認定NPO法人富士山測候所を活用する会

後援：静岡県

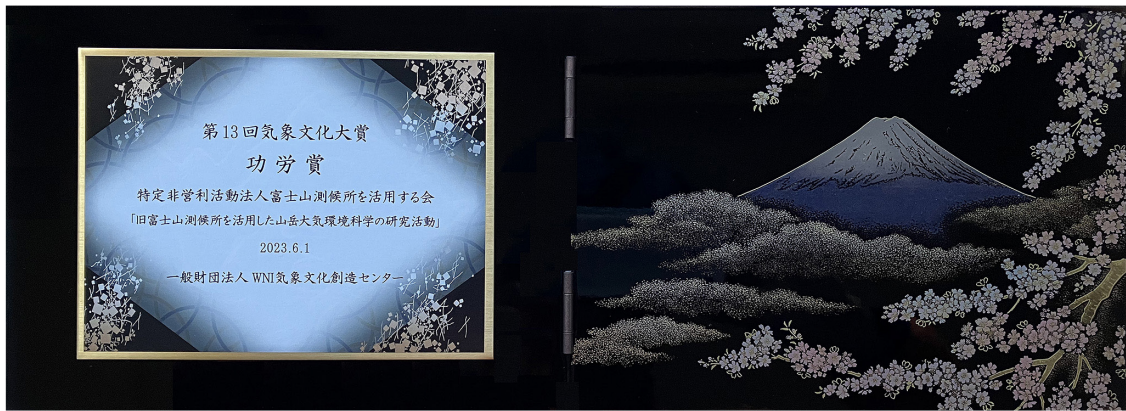
日本たばこ産業株式会社

一般財団法人 WNI 気象文化創造センター

一般財団法人 新技術振興渡辺記念会

公益財団法人 日本科学協会

Yahoo! 基金



一般財団法人 WNI 気象文化創造センター功労賞 副賞の盾

第17回成果報告会

講演予稿集

2024年3月10日(日)

連合会館、Zoom

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

一般財団法人 新技術振興渡辺記念会

公益財団法人 日本科学協会

Yahoo! 基金

ご挨拶

大雨や地震など様々な災害に翻弄される日々ではありますが、コロナ禍がやや落ち着いて、まだまだ完全な終息とは言えないものの、人々の活動も以前に戻りつつあります。旧富士山測候所(富士山特別地域気象観測所)を活用した活動も令和5年度は富士山頂で30を超えるプロジェクトが遂行され、延べ400名以上の参加者を迎えて夏期観測を行うことができました。7, 8月の2ヶ月間に行われた活動が無事に終了できたことを喜ぶとともに、これを支えてくださった事務局や山頂班の方々、NPOの多くのスタッフのご尽力に感謝いたします。

日本一高いところにある旧富士山測候所では、これまでも他所では行えない様々な研究・教育・活用につながる活動を続けられてきました。このような、貴重な研究・活動の成果が本成果報告会では発表されます。気象・大気電気・大気化学・防災などの諸問題に関連した、かつ富士山ならではのデータが報告されます。いずれも極めて興味ある内容を含むものです。これらの成果は国内外の多くのメディアにも取り上げられ、さらに令和5年末には一般財団法人WNI気象文化創造センターから気象文化大賞(功労賞)を受賞いたしました。多くの地道な活動が花開きつつあるといえるでしょう。

本日の報告会における発表をお聞きになって、ご評価、ご指導、ご支援をいただければこれに勝る喜びはありません。



第17回成果報告会 実行委員長
畠山 史郎(NPO理事、アジア大気汚染研究センター所長)

第17回成果報告会 プログラム(1/2)

実行委員長： 畠山史郎(NPO理事、アジア大気汚染研究センター所長)

副実行委員長： 三浦和彦(NPO理事長、東京理科大学嘱託教授)、和田龍一(NPO理事、帝京科学大学教授)

□ 2024年3月10日 会場:連合会館

□ 12:45 ~

■ 開会挨拶： 畠山史郎 実行委員長

■ 理事長挨拶： 三浦和彦 認定NPO法人富士山測候所を活用する会理事長

■ 夏期観測総括： 鴨川仁 認定NPO法人富士山測候所を活用する会専務理事・事務局長

□ 12:55 ~ 14:19

■ 第一部 雷の研究と富士山測候所の活用 (座長 加藤俊吾:東京都立大学)

No.	タイトル	著者氏名(所属)
SR04 Zoom	2023年夏期観測における大気電気・雷研究	鴨川仁(静岡県立大学)
SR04-3 Zoom	高高度放電発光現象および広域雷活動研究	鈴木智幸, 鴨川仁(静岡県立大学), 伊東耕二(所属無)
SR04-2 Zoom	なんと雷のリーダーからX線が! 富士山頂ならではの雷起源放射線計測	David M. Smith, J.Ortberg, J.Chaffin(カリフォルニア大学サンタクルーズ校), 鴨川仁, 鈴木智幸(静岡県立大学)
SR04-4 Zoom	電気回路的に見た富士山測候所接地線電流測定による雷観測結果	安本勝, 土器屋由紀子(研究センター), 鴨川仁(静岡県立大学), 佐々木一哉(弘前大学), 向井啓祐(京都大学)
SR05 Zoom	2023年度における富士山における全磁力・地震データ解析の進捗状況	長尾年恭, 鴨川仁, 楠城一嘉(静岡県立大学グローバル地域センター), 上嶋誠(東京大学地震研究所)
SR06 Zoom	2023年度の富士山頂教育用高精密ドーム映像制作プロジェクト	宮下敦(成蹊大学), 鴨川仁(静岡県立大学), 尾久土正巳(和歌山大学)
SS01 会場	富士山山頂観測を実現するまでの3つの工夫	望月颯希(法政大学)

休憩(10分)

□ 14:29 ~ 15:57

■ 第二部 富士山頂における大気計測 (座長 南齋勉:静岡理科大学)

SC01 会場	猛暑だった2023年の夏:富士山頂では?	皆巳幸也(石川県立大学・NPO), 鴨川仁(静岡県立大学・NPO), 林真彦(NPO)
SR09 会場	富士山頂でPM2.5, 雲, 雪からマイクロプラスチックを発見!	大河内博, 谷悠人, 王一澤, 小野塚洋介, 速水洋(早稲田大学), 皆巳幸也, 勝見尚也(石川県立大学), 竹内政樹(徳島大), 加藤俊吾(東京都立大学), 和田龍一(帝京科学大学), 長門敬明, 横山勝丘, 鳴海玄希, 岩崎洋(NPO), 三浦和彦, 廣瀬勝己, 土器屋由紀子, 畠山史郎(研究センター)
SR10 Zoom	大陸から運ばれた粒子の特徴は? ~PM1の磁性に着目~	米持真一, 村田浩太郎(埼玉県環境科学国際センター), 大河内博(早稲田大学), 反町篤行(東洋大学), Liho Lee(韓国済州大学校)
SR03 会場	雲や雨の種になる粒子を調べるー富士山頂での氷晶核およびバイオエアロゾル観測2023	村田浩太郎, 米持真一(埼玉県環境科学国際センター), 鴨川仁(静岡県立大学), 大河内博(早稲田大学)
SR01 Zoom	富士山頂の大気中二酸化炭素濃度の長期観測	寺尾有希夫(国立環境研究所)
SR02 Zoom	2023年度夏期富士山頂のCO, O3, SO2観測結果	小山有宇理, 加藤俊吾(東京都立大学), 大河内博(早稲田大学), 三浦和彦(東京理科大学), 和田龍一(帝京科学大学), 皆巳幸也(石川県立大学), 鴨川仁(静岡県立大学)
SU01 会場	「イマフジ。」プロジェクトによる富士山気象観測の試みー富士登山の安全のためにー	小柳津由依, 柴崎俊明(青山シビルエンジニアリング株式会社)

※ 認定NPO法人富士山測候所を活用する会 → NPO、富士山環境研究センター → 研究センター と記述しています

第17回成果報告会 プログラム(2/2)

□ 16:07 ~ 17:20

■ 第三部 富士山太郎坊における大気計測 (座長 大河内博:早稲田大学)

No.	タイトル	著者氏名(所属)
TR01 会場	気温を下げるエアロゾルは減っているか	三浦和彦(研究センター・東京理科大学), 永野勝裕(東京理科大学), 大河内博, 速水洋(早稲田大学), 加藤俊吾(東京都立大学), 和田龍一(帝京科学大学), 皆巳幸也(石川県立大学), 小林拓(山梨大学), 森樹大(慶應義塾大学), 矢吹正教(京都大学), 岩本洋子(広島大学), 上田紗也子(名古屋大学), 青木一真(富山大学), 鴨川 仁(静岡県立大学)
TR01 Zoom	車載ライダーでエアロゾルの立体分布を可視化する～富士山一周観測	矢吹正教(京都大学), 三浦和彦(東京理科大学・研究センター)
SR11 会場	ドローンで雲をつかむ ～雲滴分析による雲成長過程の研究～	南齋勉, 岡本大地, 藤田壺聖(静岡理工科大学)
SR02 Zoom	富士山の噴火に備えよ! 小型センサーを活用した火山ガスモニタリング	青木紳悟, 加藤俊吾(東京都立大学), 鴨川仁(静岡県立大学), 土器屋由紀子(研究センター)
SR02 Zoom	富士山麓の太郎坊におけるCO, O ₃ , SO ₂ の長期観測	野田琴音, 加藤俊吾(東京都立大学), 大河内博(早稲田大学), 三浦和彦(東京理科大学), 和田龍一(帝京科学大学), 皆巳幸也(石川県立大学), 鴨川仁(静岡県立大学)
TT01 会場	富士山太郎坊で山頂と同じ大気汚染物質の濃度を観測できる?	和田龍一, 佐藤颯人(帝京科学大学), 定永靖宗(大阪公立大学), 加藤俊吾(東京都立大学), 大河内博(早稲田大学), 三浦和彦(東京理科大学・研究センター), 小林拓(山梨大学), 皆巳幸也(石川県立大学), 鴨川仁(静岡県立大学), 松見豊(名古屋大学), 梶野瑞王(気象庁気象研究所), 松本淳(早稲田大学), 米村正一郎(県立広島大学), 速水洋(早稲田大学), 畠山史郎(アジア大気汚染研究センター・研究センター), 戸野倉賢一(東京大学)

※ 認定NPO法人富士山測候所を活用する会 → NPO、富士山環境研究センター → 研究センター と記述しています

□ 17:20 ~

■ 閉会挨拶 : 皆巳幸也(NPO理事・副事務局長、石川県立大学)

2023年夏期観測における大気電気・雷研究 (SR04)

鴨川仁¹, 富士山雷研究グループ²

1.静岡県立大学グローバル地域センター自然災害研究部門, 2.NPO富士山測候所を活用する会

1. はじめに

2008年からスタートした富士山山頂での大気電気観測は、宇宙線・放射線観測の補助的な役割として始まったものである。しかし以後の数年の測定の結果、取得されたデータから大気電気研究を進展させる成果も得られた。それゆえ、2012年から大気電気研究は独立したグループとして2023年も観測を行った。コロナ禍ゆえ夏期観測が中止になった2020年も太郎坊・御殿場などを活用し研究活動を続けた。

2023年でも富士山という場所を活用し大気電気に関連する諸現象の研究を行った。大気電気・雷チームは次の6のサブテーマ、①被雷対策具体化のために接地系と部材間の接続状況の調査および富士山山体を測定器とした上向き雷の研究、②雷雲・雷活動において発生する高エネルギー放射線、③スプライトをはじめとする高高度大気中における放電現象および雷放電測定、④新型広帯域大気電場測定機器の試験、⑤首都圏極端気象のモニタリング、⑥地吹雪時に発生する大気電場変動、を行った。本稿では、③のうち雷放電測定および、④についてふれる。①については本講演集の安本勝ら、②についてはDavid Smithら、③については鈴木智幸らの原稿を参照されたい。なお⑤及び⑥については本稿では触れないが、⑤については関連業績¹⁾がある。

2. 雷放電位置評定観測

Blitzortung.org (以下Blitzortung) は、到着時刻法に基づいて、VLF帯電波受信機で雷放電の位置検出するためのネットワークである²⁾。このネットワークは、低予算で多くのステーションを持つ雷位置ネットワークの確立を目指している。装置の価格は、電子パーツ代のみとなるが一式300ユーロ程度である。ただし、アンテナのハウジングは自ら用意する。ボランティアで参画を望むユーザーは、装置の部品を購入し、装置の組み立てを行うことで装置を希望する場所に設置できる。Blitzortungは、放電位置を特定するための計算サーバーを用意していることから、参画する複数のボランティアユーザーの受信局の相互のデータを用いて、位置標定を行う。参画しているユーザーは、位置標定したデータを無償で入手できる権利を有する。低価格であることと、設置が容易である利便性から、現在、全世界で数千台の機器が設置されていると予想される。本研究では、夏期に山頂、通年で御殿場、太郎坊、富士ヶ峰に設置し、富士山周辺の落雷検知率を上げるための設置を行った。2023年については夏期、富士山周辺では図1のような結果が得られた。2023年の特徴としては、2022年に続き山頂周辺に落雷が多く、この2年は過去16年にないとりわけ活発な雷活動状況であった。

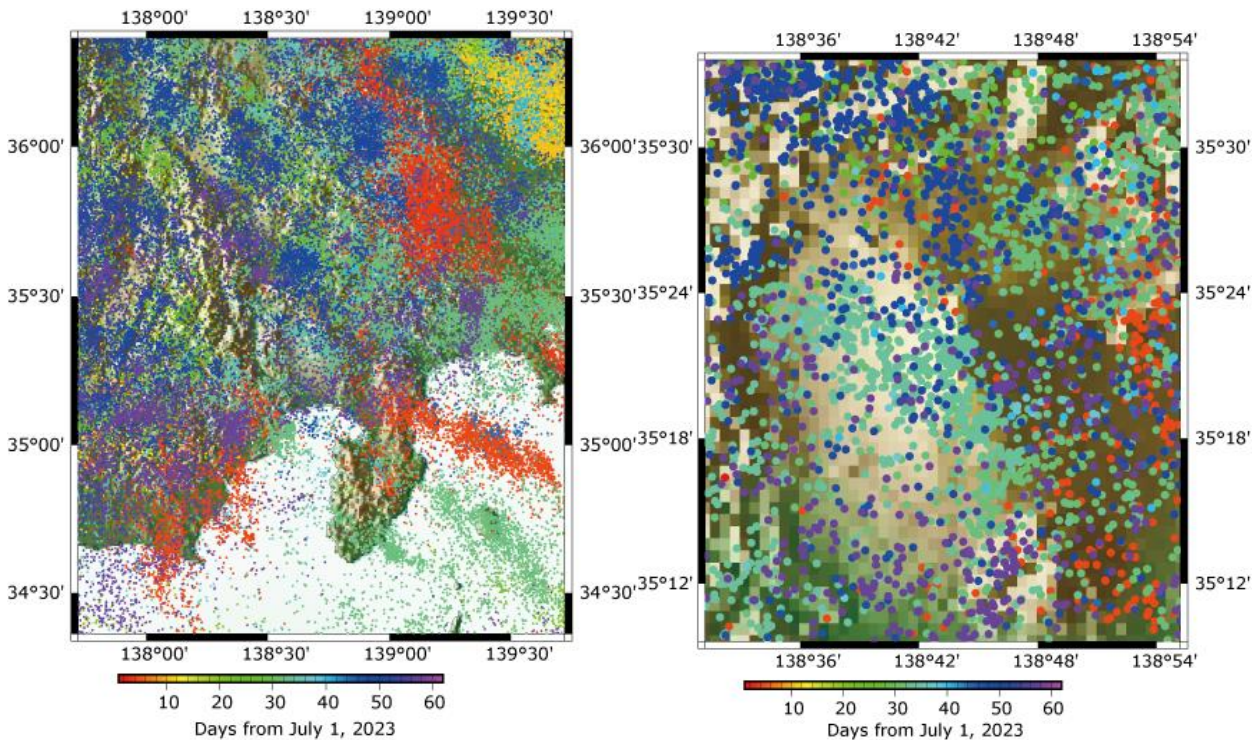


図1 Blitzortung.org によって検知された雷放電。左は富士山周辺、右は、富士山範囲内。



図2 一号庁舎屋根に設置した2種のフィールドミル

3. 大気電場観測

雷放電の発生については前節2で示したような落雷位置標定機器を用いるが、雷雲の存在を知るには、雷雲から発生する静電気を測定するのがよい。一般的にフィールドミルが使用される。晴天静穏時の地表での大気電場強度は約100 V/m程度と微弱であるが、富士山のような雷雲直下では100

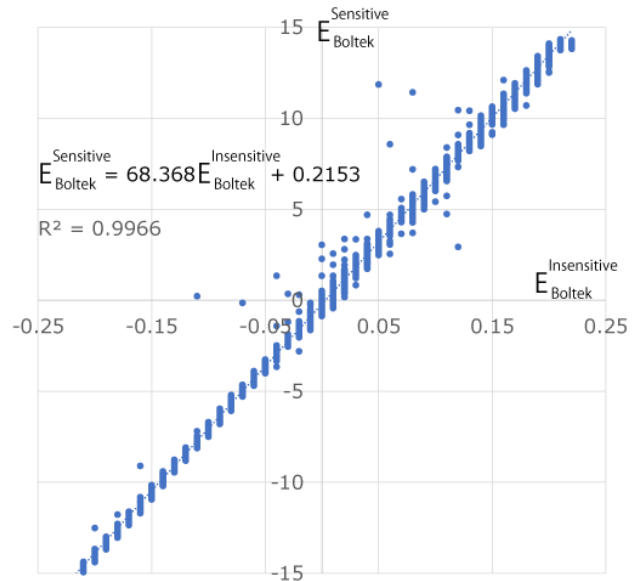


図3 Boltek社製フィールドミルの高感度と低感度の計測値の関係図（算出データは8月1日のものを使用）

kV/m以上に達するため、ワイドレンジに測定できる装置が必要である。さらに、フィールドミルをポールの上や建物屋上

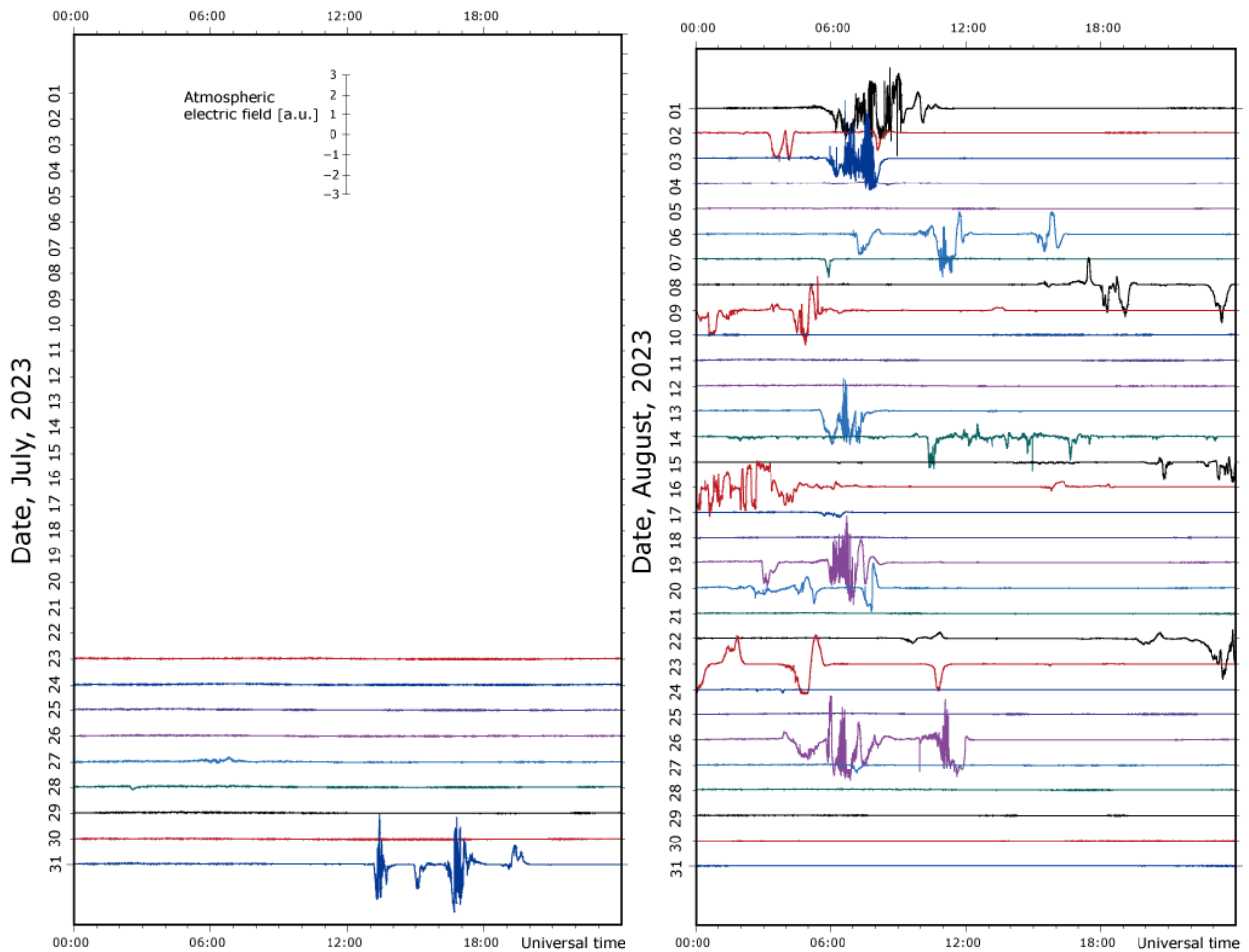


図4 2023年夏期観測中のフィールドミルの時系列データ

に設置した場合、周辺との凹凸の状況に応じて電場が集中することがあり、地表面に比べて数倍の電場強度になる場合がある。従来のフィールドミルで、計測飽和を起こすことなくこの問題に対応するには、以後に示すような感度の異なる複数台のフィールドミルによる同時測定が必要であった。そこで音羽電機工業株式会社は、1台のセンサーのみでワイドレンジ計測ができるフィールドミルを開発した³⁾。2023年は従来活用してきたBoltek社のフィールドミルとの比較をし、動作確認を目指す。本機器は、山頂で高感度および低感度に調整された2台のBolteky社製機器を山頂に設置している(図2)。後者のBoltek社製フィールドミルについては過去、晴天静穏時山岳日変化の山岳効果の解明などに貢献している⁴⁾。

まず図2(写真内左側に設置)にある2台の高感度と低感度のフィールドミルの関係を調べた。図3に示した2つの測定値の関係を調べた。この図3の関係図から、低感度の観測値は高感度の約68分の1であることがわかった。次に、雷雲の接近、発達によって発生する強電場を認識するために、観測期間中の低感度フィールドミルによる大気電場の時系列を図4に示した。その結果、図4に示されるように、2023年7月23日以降、欠測および測定値飽和なく動作が良好であることも確認できた。

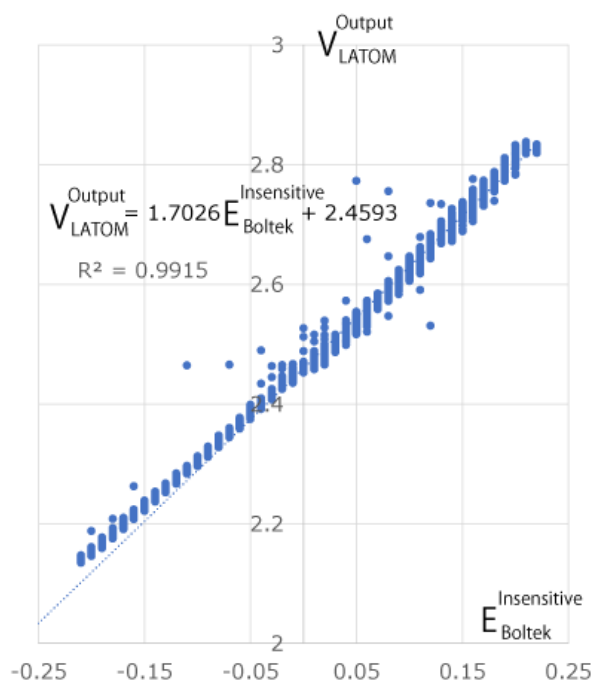


図5 Boltek社製フィールドミルの高感度と低感度の計測値の関係図(算出データは8月1日のものを使用)

次に、LATOM(図2における右側に設置)とBoltek社製低感度フィールドミルの計測値の比較を行った。図5は、測定値の比較を行っている。2つの相関は極めて良いが、負の大気電場において相関直線が正の大気電場のときと比べて、相関直線からわずかにずれているようにみえる。

4. おわりに

2023年の夏期観測においては、山頂において活発な雷活動を検知することができた。また、大気電場測定、雷放電位置標定観測ともに、良好な観測結果を残すことができた。

参考文献

- 1) Fujiwara, H., Okochi, H., Kamogawa, M., Suzuki, T., Hayashi, S., Sato, N., Orihara, Y., Matsumoto, J., Hamada, J-I., Murata, K., Yoshikawa, E., Kudo, T. (2023). Characteristics of hailfall and lightning in a splitting thunderstorm observed on May 4, 2019 in the Tokyo Metropolitan Area, Japan, *J. Atmos. Electricity*, **42**, 1-14.
- 2) Kamogawa, M., Suzuki, T., Fujiwara, H., Narita, T., Wanke, E., Murata, K., Nagao, T., Kodama, T., Izutsu, J., Matsuki, A., Tang, N., Minamoto, Y. (2023). Characteristics of the Blitzortung.org Lightning Location Catalog in Japan, *Atmosphere*, **14**, 1507-1507.
- 3) Kudo, T., Kamogawa, M. (2019). Development of electric field mill and initial results of ground-based field mill network observation. Proc. 11th Asia-Pacific International Conference Lightning, 1-4
- 4) Kamogawa, M, Suzuki, Y., Sakai, R., Fujiwara, H., Torii, T., Kakinami, Y., Watanabe, Y., Sato, R., Hashimoto, S., Okochi, H., Miura, K., Yasuda, H., Orihara, Y., Suzuki, T. (2015), Diurnal variation of atmospheric electric field at the summit of Mount Fuji, Japan, distinctly different from the Carnegie curve in the summertime, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 3019-3023. doi: 10.1002/2015GL063677.

高高度放電発光現象および広域雷活動研究 (SR04-3)

鈴木智幸, 鴨川仁¹, 伊東耕二²

1. 静岡県立大学, 2. 所属無

1. はじめに

雷雲上空で発生する雷放電に起因する放電現象は、高高度放電発光現象と呼ばれている。これまでに、その発生高度、形状、成因等の違いにより、スプライト、エルブス、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。日本においても、これまで発見された大多数の現象が観測されている。我々のグループでは、富士山山頂から高高度放電発光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、スプライト、エルブス、巨大ジェットの観測に成功してきた。また、2019年からは、高感度カラーFHD(フルハイビジョン)カメラも導入して観測を実施しており、画像には1ms単位のGPS時刻が挿入されていることから、雷位置標定装置の位置情報及び放電種別等の気象データと比較することで、雷雲がどのような状態のときに発生したのかについて詳細に知ることができる態勢が整えられている。昨年に引き続き世界規模の雷観測ネットワークであるBlitzortung.org(以下、ブリッツという)の観測センサーを山頂、太郎坊、御殿場、富士ヶ峰に設置した。また、2023年の観測においても、富士山山頂に高感度カメラを複数台設置して万全の態勢で臨んだ。しかし、2023年夏期は富士山山頂やその付近が雲や雷雲に覆われ観測ができなかったことが多く、結果として雲内の放電発光は観測できたものの、高高度放電発光現象の観測成果は皆無であった。一方で、富士山山頂観測の補助観測として、協力者の観測点も含めると関東～東海にかけて、地上観測点を運用している。今回は、補助観測点で2023年夏期観測期間中に撮影された高高度放電発光現象および雷放電について紹介する。

2. 富士山頂からの高高度放電発光現象観測をサポートする地上光学観測

図1は、静岡県立大及び協力者が関東～東海に設置している地上観測点の配置である。観測点毎に、カメラの視野の違いはあるものの、北西から北東方向が観測方位となっている。東京都に2か所、静岡県に1か所の観測点があり、東京の観測点のうち1か所では、FHDカメラによる観測が行われている。また、すべての観測点においてGPS時刻が挿入された動画が撮影可能となっている。2022年夏期観測の成果発表会では静岡県内の企業と開発したFHDカメラ画像にGPS時刻を挿入する機材の導入及び富士山での観測について報告した。2023年夏期観測では、富士山山頂及び都内からGPS時刻が挿入されたFHD観測を行い、はじめてGPS時刻付きのブルースターター及びスプライトのFHD画像が得られた。

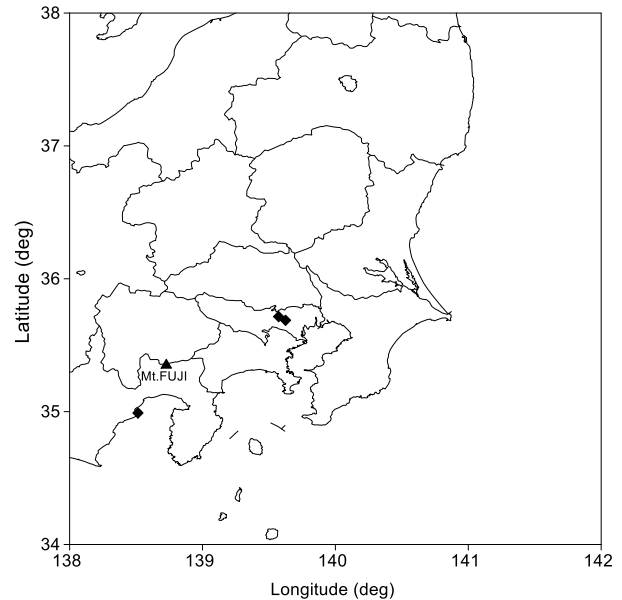


図1 富士山からの高高度放電発光現象観測をサポートする地上観測点の配置. ▲は富士山, ◆は富士山周辺に配置された光学観測点の配置を示す。

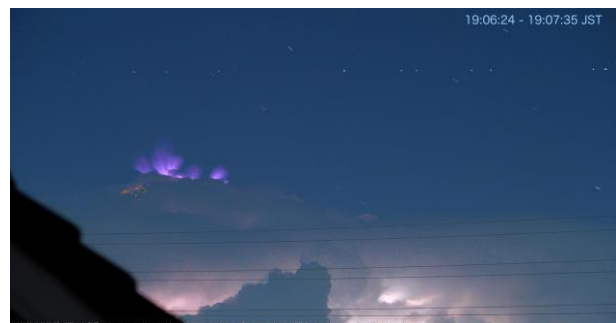


図2 2023/9/5 19:05:22.698JSTに観測されたブルースターター(上). 約1分間に観測されたブルースターターを重ね合わせた画像(下)。



図3 2023/9/5 にブルースターターを発生させた雷雲の広角画像

(1) 2024/9/5に北関東で発生したブルースターター

図2に2023/9/5にFHDカメラで観測されたGPS時刻付きの画像を示す(図2上). GPS時刻は画像の右下に挿入されている. この図では, 雷雲のオーバーシュートした雲頂から飛び出た逆円錐状に青というよりは紫色に近い発光のブルースターターがみられる. この日は, 19:03~19:15JSTの間に約50事例のブルースターターが観測された. 約1分間のブルージェットの画像を合成すると, すべてのブルースターターが雷雲の雲頂から飛び出していたことが分かる.

図3に同時刻の東京都内の別の場所から撮影された同じ雷雲の広角レンズを使用したモノクロ画像を示す. この画像は, 約6分の動画から切り出した画像で, ブルースターターの発生した時間帯では, 雷雲上部全体が明るく発光する場合や雲頂がオーバーシュートした対流の中心と思われる部分における明るい発光が, 非常に短い間に多数繰り返される, 非常に活発な雷発光が見られた(発表当日は, この動画を紹介する).

(2) 2024/8/26-27に発生したスプライト

東京都内から, この期間に, FHDカメラによってGPS時刻付きの約30事例のスプライトの画像が撮影され, これらは北陸から関西の広範囲で発生した可能性が高いことが分かった. 図4(上)にスプライトの一例を示す. この事例は, この日観測されたスプライトの規模としては, 大きな事例であった. 一方, 全景はとらえられていないため巨大ジェットと断定はできないが, 巨大ジェットが疑われる事例(図4中), その約100ms後に巨大ジェット発生後にみられる, 2次ジェットと思われる現象(図4下)がとらえられた.

(3) 2024/9/5に発生したスプライト

静岡県清水市から北方向に向けた高感度モノクロカメラによって北関東で発生したスプライトが観測された(図5).

3. まとめ

2023年夏期は, 万全の態勢で臨んだものの富士山山頂から高高度放電発光現象をとらえることはできなかった. 一方で, 観測された日数は少なかつたものの, 地上観測によって, 一昨年開発したGPS時刻インポーザーの高精度な時刻が挿入されたFHD画像が取得されたことは, 大きな収穫であった. 今後は気象データ等と組み合わせて, 高高度放電発光現象を発生させる雷雲をより詳細に解析する予定である.



図4 2024/8/26-27に観測されたスプライト(上), 巨大ジェットと疑われる事例(中)及び巨大ジェットの2次ジェットが疑われる事例(下)



図5 2023/9/5に観測されたスプライト

なんと雷のリーダーからX線が！富士山頂ならではの雷起源放射線計測（SR04-2）

D. M. Smith¹, 鴨川仁², 鈴木智幸², J. Ortberg¹, J. Chaffin¹

1. カリフォルニア大学サンタクルーズ校, 2. 静岡県立大学

1. はじめに

高エネルギー放射線の3つの形態が雷雨に関連して観測されている。ガンマ線グローは数分以上続くことがあり¹⁻³, 負リーダーの先端で発生するX線は, ステップに伴うマイクロ秒のバースト(通常数百keVのエネルギー)^{4,5}, 地上ガンマ線フラッシュ(Terrestrial Gamma Flash; TGF)は, グローと同じ高エネルギースペクトル(光子エネルギーは最大40 MeV)を持つが, 時間スケールは短い(数十マイクロ秒から約1ミリ秒)。ほとんどのTGFは宇宙から観測されている^{6,7}。しかし, 少数の下向きのTGFが地上から観測されており, その多くは日本では冬の中部地方西海岸付近で観測されている⁸⁻¹¹。TGFは, 他の2つの現象とは異なり, 非常に明るく, 10^{18} のオーダーのガンマ線を発生し, 発生地点のごく近くにいる人に放射線の危険をもたらすのに十分である¹²。

2. 測定方法

カリフォルニア大学サンタクルーズ校で作られたガンマ線検出器のアレイが, 鴨川グループによって富士山に配備され, 今年で5シーズン目を迎えた。GODOTとTHORという2つの観測装置は, ガンマ線やその他の高エネルギー粒子を検出するための複数のシンチレータで構成されている。それぞれ, 弱くて遠い事象を検出するための大型検出器と, 大型検出器を飽和させ, あるいは停止させる非常に明るい事象を測定するための小型検出器を持っている。どちらの検出器も, 個々のガンマ線光子のタイミングとエネルギーを特定しようとするもので, シンチレータによって可視光に変換され, 光電子増倍管によって電流パルスに変換される。

これらのパルスはデジタル化され, リアルタイムで分析され, どちらの装置もそれぞれのガンマ線光子の到達時間とそのエネルギーを記録することができる。次のセクションで示すデータはTHORからのもので, 3つの大きく異なるサイズのプラスチックシンチレータ(小型, 中型, 大型)と, ヨウ化ナトリウム(NaI)製の大型検出器1つを備えている。

プラスチックシンチレータは高速応答(最大4,000,000カウント/秒のカウントレートで動作するように)に最適化されており, NaIは光子のエネルギーをより正確に記録するために最適化されている。しかし, 非常に明るいTGFの間や, ステップリーダー

X線の非常に短い持続時間のパルスの間は, 複数のガンマ線からのパルスが重なり, 機器はもはや時間とエネルギーの個々のデータ記録に分離することができない。このような状態では, GODOTはカウントの記録を停止するだけですが, 新しいTHOR装置は, 80MHzでデジタル化された光電子増倍管の生の出力を示す, 最大300マイクロ秒のデータの完全なデジタル記録を保存する。

これにより, 重なり合ったパルスを直接観測することができ, 時間, エネルギー, 明るさのデータを取り出すことができる。THORはタイミングにおいてもGODOTを上回る。GODOTのタイミング精度は数ミリ秒である。これは, データ取得コンピュータの絶対タイミングにネットワークタイミングプロトコル(NTP)を使用しているためで, 検出器のデジタイザからコンピュータにデータを移動する際にわずかな時間遅延が発生するためである。THORはGPSレシーバーを使用しており, レシーバーからのパルス毎秒の信号は直接ディテクターのエレクトロニクスに送られ, そこでGPSからのものであることを示す特別なビットを持つデータストリームの別のイベントとして処理される。

これにより, THORのデータはマイクロ秒単位の絶対精度を持つことになり, ガンマ線データを電波データと比較し, 雷プロセスのどの部分でガンマ線が発生しているかを明らかにする上で非常に貴重なデータとなる。

3. 観測

2022年, 我々は富士山頂から地上から見た日本初の夏のTGFを報告した。2023年の夏, 富士山は私たちに別のプレゼントをくれた。下向きのステップリーダー(雷が地上に接近する最初の瞬間)とそれに続くダートリーダー(最初のステップリーダーによって作られた電離経路に沿って雲から降りてくる電荷の後のパケット)によるX線バーストの例であると私たちが考えているいくつかの事象である。

図1(a)から1(d)は, 富士山観測所のロゴスキーコイルによって記録された(本稿の安本らの内容を参照)落雷の一部である一連のX線バーストの異なる部分からのTHORデータで, ある段階で雷が観測所自体に落ちたことを示している。プロットの下部に沿って, 各ドットは1つの光子を表し, 縦軸は校正されていないチャンネル(おおよそ100 keVから10 MeVまで)のエネルギー

の対数である。これはTHORが連続的に記録しているデータモードである。プロットのもっと上には、80 MHzでサンプリングされた検出器の直接デジタル化された出力がある（トリガーモード）。横軸はミリ秒単位の時間であり、切り捨てられた秒は図のタイトルに示されている。

図2(a)から図2(c)は、その20秒前に発生した別のフラッシュで、ログスキーコイルがトリガーされなかったため、おそらくステーションに直接当たらなかったと思われる。この場合、雲から地面への閃光（CG）なのか、雲内閃光（IC）なのかはわからない。

参考文献

- 1) Torii, T., Takeishi, M., Hosono, T. (2002), Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity, *J. Geophys. Res.*, **D107**, 4324
- 2) Tsuchiya, H. et al. (2007), Detection of High-Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 165002
- 3) Wada, Y. et al. (2023), Negative Excursion of Surface Electric Fields During Gamma-Ray Glows in Winter Thunderstorms, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2023JD039354
- 4) Moore, C. B., Eack, K. B., Aulich, G. D., Rison, W. (2001), Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2141–2144.
- 5) Dwyer, J. R. et al. (2005), X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01803
- 6) Fishman, J. et al. (1994), Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, *Science*, **264**, 1313-1316
- 7) Smith, D. M. et al. (2005), Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV, *Science*, **307**, 1085
- 8) Enoto, T. et al. (2017), Photonuclear reactions triggered by lightning discharge, *Nature*, **551**, 481-484.
- 9) Bowers, G. et al. (2017), Gamma Ray Signatures of Neutrons From a Terrestrial Gamma Ray Flash, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 10,063-10,070.
- 10) Wada, Y. et al. (2019), Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 061103
- 11) Wada, Y. et al. (2022), Characteristics of Low-Frequency Pulses Associated With Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL097348
- 12) Dwyer, J. et al. (2010), Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting radiation doses received in aircraft, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D9, D0920621, 1727-1730.

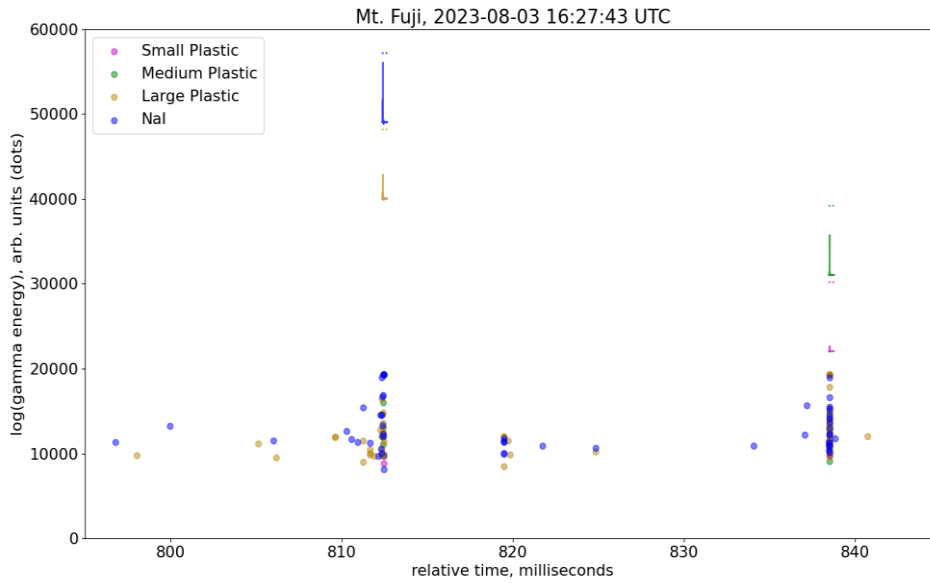


図1(a) ログスキーコイルをトリガーしたフラッシュは、30ミリ秒の間に3つの別々のリーダーシーケンスを示している。最初のシーケンスは~812 msで、2つの大きな検出器のみをトリガーした。最後のシーケンス (~838ミリ秒) ははるかに明るく、最小の検出器もトリガーした。残念なことに、最初のトリガーからのデータがまだ読み出されていないため、大型検出器が再トリガーするには、最初のシーケンスから時間が経ちすぎている。

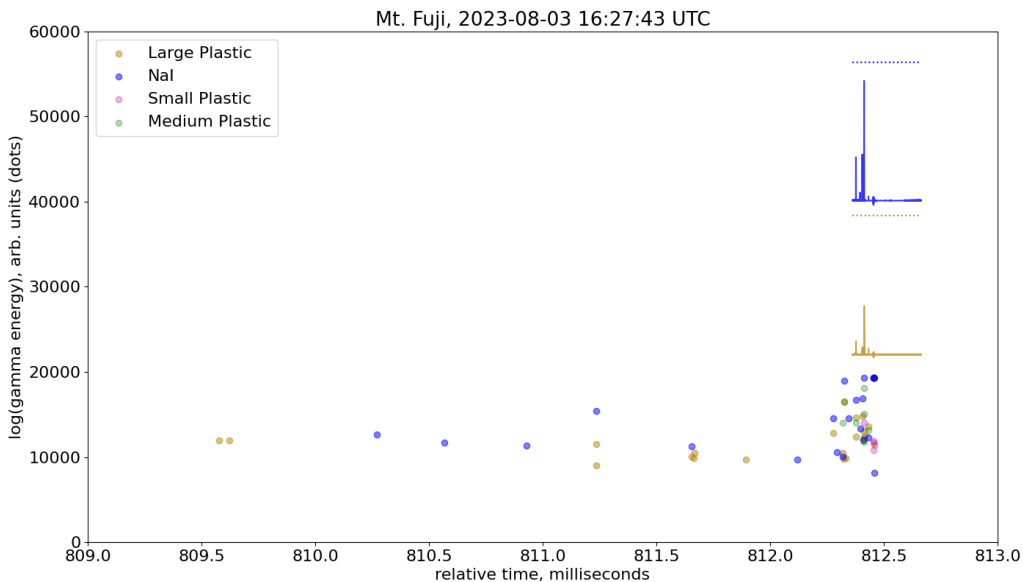


図1(b) 最初のシーケンスのリーダー進行3msのクローズアップ。これがステーションに衝突したのか、あるいはそのすぐ近くに衝突したのかは不明。最後の方(最後の0.2ミリ秒ほど)で明るくなっているが、劇的な明るさではない。このフラッシュに関連する電波データを調べるまでは、これが地上へのステップ状のリーダーであり、上空を移動するICリーダーでないことを確信することもできない。

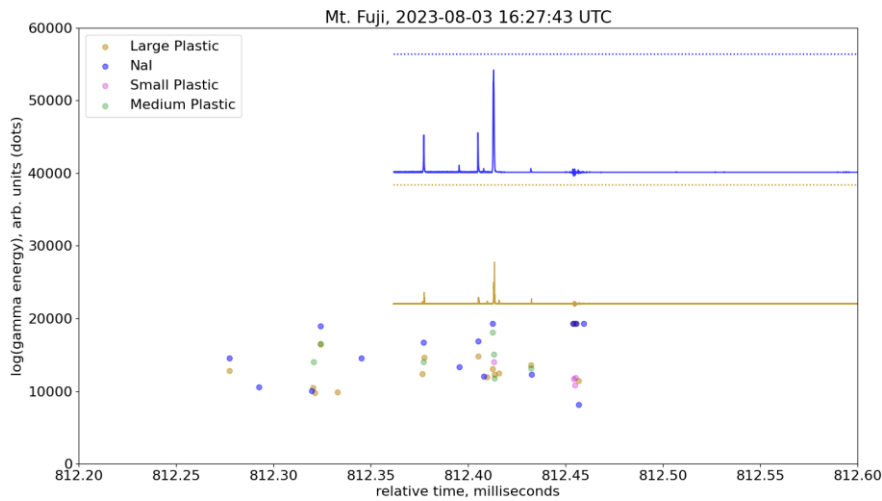


図 1(c) フラッシュの最初のシーケンスの最後の 0.2ms のクローズアップ。812.46 ミリ秒の特徴は、NaI 検出器では非常に高いエネルギーのカウントがいくつか、小型プラスチック検出器では非常に低いエネルギーのカウントがいくつか観測されているように見えますが、トレースデータを見ると、ベースラインの上下に振動しているため、この時間に起きていることは単なるノイズであることがわかります。THOR は通常、電磁ノイズに非常に強いので、これはおそらく、リーダーが地面に取り付けられ、その地域に非常に強い電磁ノイズが発生した瞬間を表している。

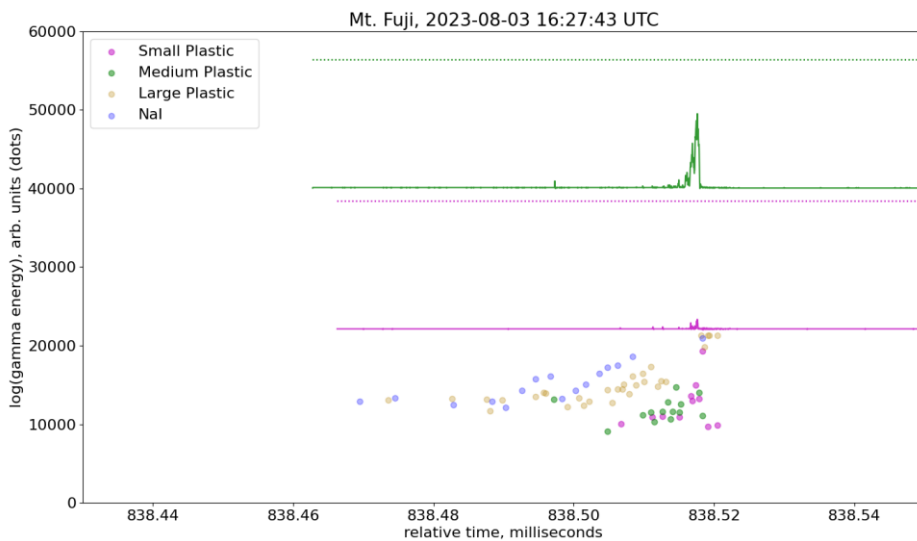


図 1(d) 最後のリーダーシーケンスのクローズアップ。図 1b の 3ms に対し、ここではリーダー全体の進化が約 0.05ms で起こっている。これは、最初のリーダー（図 1a-1c）によって確立されたイオン化チャネルを使用したダーツリーダーであることを示す可能性がある。また、X線発光が見えるようになる前に、リーダーがすでに下方に移動している可能性もある。イベントリストのデータ（点）を見ると、大型検出器が最初に現れ、高い計数率によって飽和するために消えていき、最後に飽和していないのは小型検出器と中型検出器だけであることに注目してください。また、強度は最後の最後で非常に速く上昇し、トレースは多くの低エネルギーカウントが積み重なってできているように見える。これらの特徴はすべて、ステーションへの直接攻撃を示唆している（リーダーが非常に近くにいないければ、非常に低エネルギーのカウントは遠くまで飛ばないだろう）。

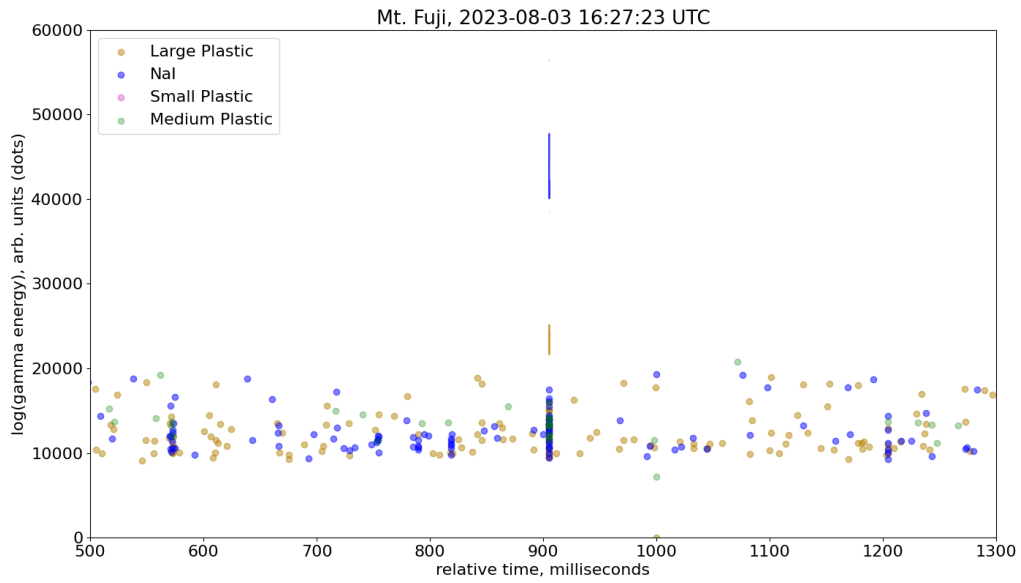


図2(a) このフラッシュは、約650msの間隔をあけた、より長いリーダーのシーケンスを示している。ログスキャーコイルには信号が記録されておらず、明らかに明るくなるシーケンスもない。これはおそらく、頭上で進行する一連のICリーダーか、ステーションからある程度離れた場所で発生した、複数のリターンストロークを持つCGフラッシュのどちらかであろう。

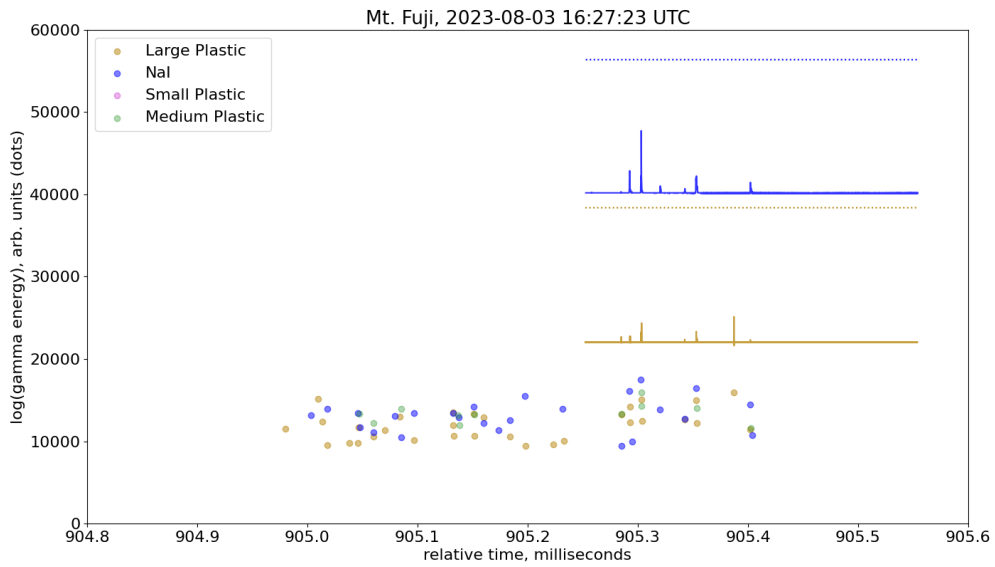


図2(b) 905 msに発生した最も明るいリーダーシーケンスのクローズアップ。これは、トレース収集をトリガーしたこのフラッシュの唯一の部分であり、2つの最も大きな検出器のみであった。

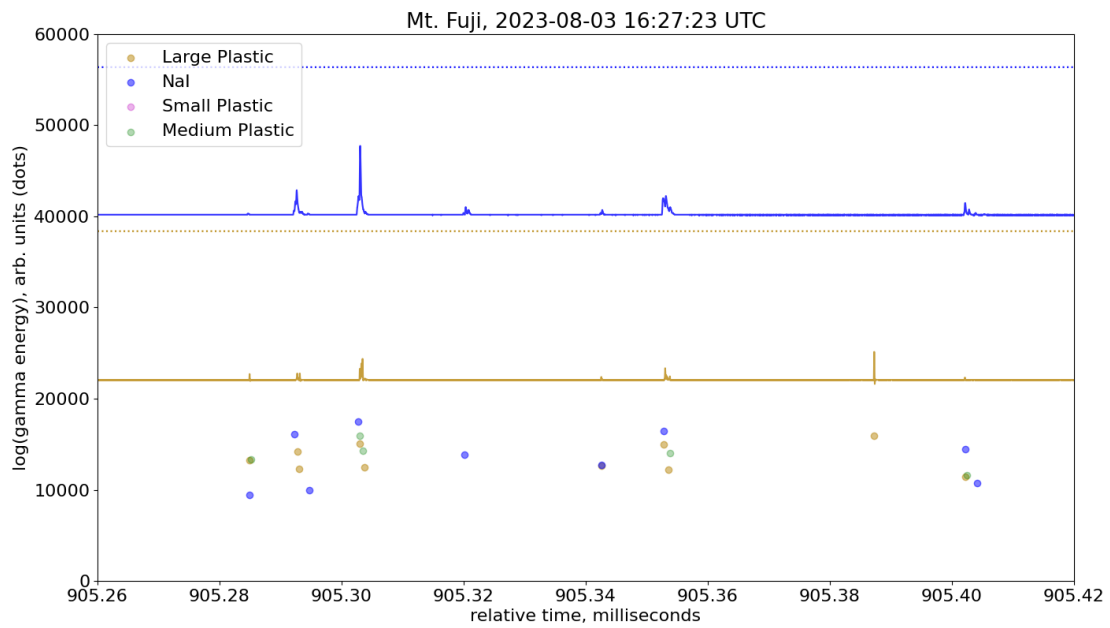


図2(c) このフラッシュで最も明るいリーダーシーケンスの0.12ミリ秒の極端なクローズアップ。各パルスは、およそ2マイクロ秒以内に束ねられた数カウントのクラスターであることに注意。これは、フロリダ5)などで観測されたステップリーダーからのX線バーストの典型である。

電気回路的に見た富士山測候所接地線電流測定による雷観測結果 (SR04-4)

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 向井啓祐^{4,5}, 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, 4.京都大学, 5.核融合研

1. はじめに

富士山測候所の接地線電流測定は、測候所が岩盤上で、3776mの高位置にあり、接地線が山麓と繋がっていることが分かったことから直撃雷の測定ができるのではないかと、2012年夏の観測で初めて実施した。この時、直撃雷は観測されなかったが、周辺雷による接地線電流が観測され、以降の観測では直撃雷だけでなく、周辺雷現象も測定できるように対象雷現象の特性が測定できるように測定系に改良を加えて接地線電流の測定を行っている。この間の測定は毎年7月上旬から8月下旬までの2ヶ月弱になる。この期間に測定された雷現象には雷現象特徴を反映した多数の測定結果がある。①2015年に上向きリーダの直撃雷が観測され、1秒近くの前兆現象も観測された。②2017年ステップリーダが観測できた。③リーダとリターンストローク、および二重落雷の全体像を捉えることができた。④2021年は、第1雷撃が大電流の上向きリーダと考えられる二重落雷が観測された。⑤2022年は、正極性下向き雷、及びリーダと多重落雷が複数観測された。

最初は測候所落雷電流のみを測定対象に考えていたが、周辺の落雷現象により接地線に電流を流すことがわかり、現象に合わせた改良を進めたことで他の落雷現象による接地線電流の測定も可能になった。富士山を聴診器として広範囲の雷現象が観測できるようになっている。このことは測定系の改良により雷現象だけでなく接地線に電流を流す雷以外の自然現象にも適用可能であり、自然現象発現との相関を取ることで広範囲で他の自然現象の解明も可能になると考えている。本研究では接地線電流測定による雷観測結果を電気回路的に見て接地線電流測定による現象解明を行った。

富士山測候所は3776mの高さにあり、雷雲に近く高電界が得られ、接地線は山麓の低抵抗接地極に繋がっている。回路として見た場合、主要回路定数は絶縁破壊等で定数変化せずに安定な回路定数になっていると考えられ、再現性の得られる測定が可能である。そのため、落雷現象は複雑であるが、単純化した電気回路に置き換えることで理解が得られ易くなる。ここでは、この方法で観測結果を整理検討した解析結果、2023年雷現象測定結果、及び今後の測定で改良すべき点について報告する。

2. 接地線電流測定系

雷現象により流れる接地線電流測定は、富士山をを活用した新しい手法の雷観測装置である。富士山測候所の既存の接地線内蔵の電源引込設備を生かして開発したもので、図1に示す構成(赤色部)になっている。

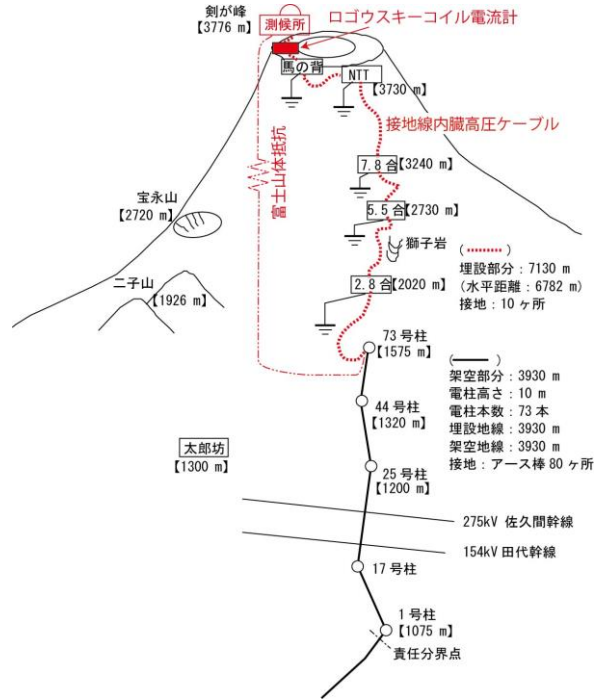


図1 富士山体測定系の構成

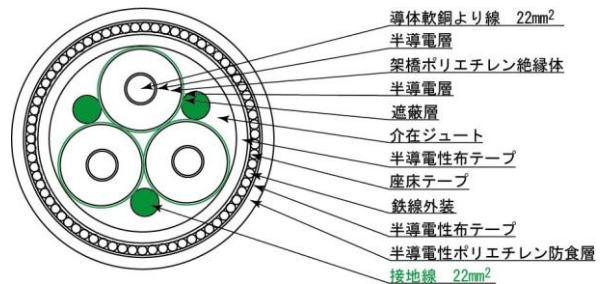


図2 富士山測候所引き込み高压ケーブルの構成

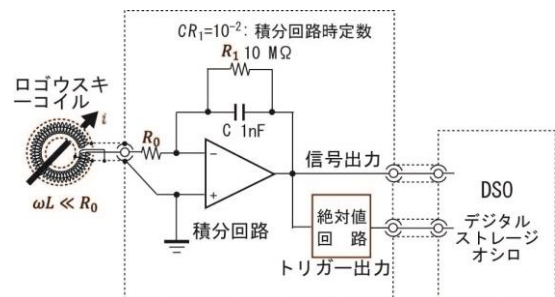
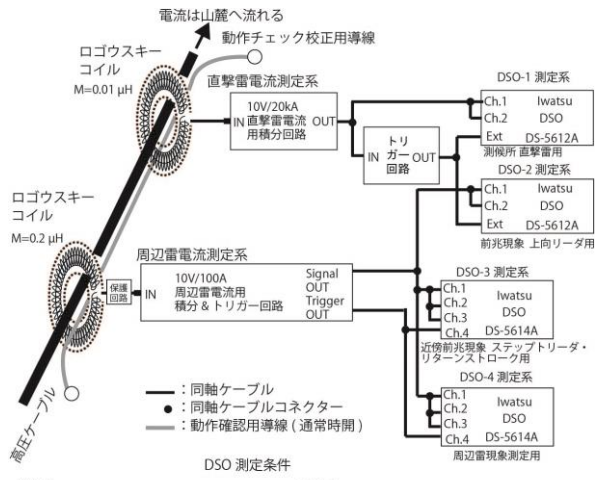


図3 ログウスキーコイル電流計の基本回路



DSO-1 測定系		DSO-2 測定系	
水平軸	M Pos. : 0, 100 μs/div, 1kpts.	水平軸	M Pos. : +250ms, 100 ms/div, 1Mpts.
垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div (4kA/div).	垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div (20A/div).
Trigger	Ch.2 : AC 200 mV/div (40A/div).	Trigger	Ch.2 : AC 200 mV/div (2A/div).
	エッジ, Ext10, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 100 mV (0.2kA)		エッジ, Ext10, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 100 mV (0.2kA)

DSO-3 測定系		DSO-4 測定系	
水平軸	M Pos. : 0, 10 ms/div, 100kpts.	水平軸	M Pos. : 0, 200 μs/div, 1kpts.
垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div (20A/div).	垂直軸	Ch.1 : AC 2 V/div (20A/div).
	Ch.2 : AC 500 mV/div (5A/div).		Ch.2 : AC 1 V/div (10A/div).
	Ch.3 : AC 100mV/div (1A/div).		Ch.3 : AC 500mV/div (5A/div).
Trigger	エッジ, Ch.4, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 50 mV (0.5A)	Trigger	エッジ, Ch.4, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 50 mV (0.5A)

図4 接地線に流れる電流の雷現象による測定条件

測候所は山麓から高压ケーブルを引込、測候所と山麓接地極は図2に示す高压ケーブル内接地線で繋がっている。測候所被雷電流は、測候所接地抵抗が大きく大半が接地線を通して接地抵抗が小さな山麓側に流れるため、ケーブル内接地線電流を測定することで知ることができる。測候所と山麓は、接地線だけでなく富士山山体抵抗とも繋がっていることとなるため、この大きな循環路で落雷電流が作る磁束を高感度で捉えることができるようになっていく。また、測候所は3776 mの高さにあり雷雲の誘導電荷変化が受けやすく、静電誘導電流を検出することも可能になっている。この電流変化は、当初測定器のオフセットの変動によるものと考えていたが、誘導電荷の変化によるものであることがわかっていく。

以上の雷現象により接地線に流れる電流は、ログウスキーコイル電流計で高压ケーブル全体の電流を測定している。ちなみに高压ケーブルには電源電流も流れるが、電源電流の漏洩が無ければケーブル全体としての電流、すなわち零相電流は流れない。電源電流の影響を受けないようにするため、本来は測候所を絶縁させ接地線と電源ケーブルを一体にしてログウスキーコイルで測定することが必要であるが、実現可能にするための費用や手間を考えると現実的でなく、高压システムの絶縁を確保することで高压ケーブルのみの電流を測定することで実現している。富士山にも流れる電流は無視できるとしている。また高压ケーブルに併設している接地線に流れる電流は測定しておらず校正する必要がある。図4に測定系全体と測定条件を示している。

接地線電流は、ログウスキーコイルで測定している。大電流用低感度系と小電流用高感度系の2種類を使用している。後者の高感度系は直撃雷が流れると大きなサージ電圧により高

感度測定系が破損するため、回路特性を損なわない寄生容量が小さく低抑制電圧のネオン管でその保護をしている。

2023年の観測は図4に示す測定系、及び測定条件で行った。DSO-1は直撃雷のような大電流の測定系に使用している。確実に直撃雷電流を捉えるため、トリガーレベルは大きくしており設計値は200Aとしている。

DSO-2は前兆現象上向きリーダ測定用である。DSO-1が動作したときにDSO-2も動作し750ms遡った時から高感度系ログウスキーコイルの出力電流を測定できるようにし上向きリーダ電流を捉えるようになっている。

DSO-3は近傍の前兆現象、ステップリーダ・リターンストローク測定用である。また多重落雷の測定も可能である。トリガーレベルは0.5Aとしている。

DSO-4は周辺雷現象による電磁誘導によって流れる接地線電流測定用である。感度が高いため、遠方雷の測定が可能である。また近傍のステップリーダによる電磁誘導電流の測定が測定値を積分することで可能である。トリガーレベルは0.5Aである。

DSO-2~DSO-4は感度が高く、静電誘導電流の測定が可能である。

3. 接地線に電流を流す現象

3-1 雷現象

富士山体上接地線に電流を流す雷現象は、観測から図5に示す五つあることが分かっている。

観測できる対地雷には以下の三つがある。

- (1) 一つ目が測候所直撃雷電流である。
- (2) 二つ目が測候所電極捕集電流である。対地放電点と測候所との間には大きな電位差が生じ放電点が移動する場合もあると推測される。
- (3) 三つ目が山麓側被雷による逆流電流である。三つ目の逆流電流は山麓側落雷により接地線電位が上昇し、その電位により測候所の富士山山体抵抗に流れる電流である。接

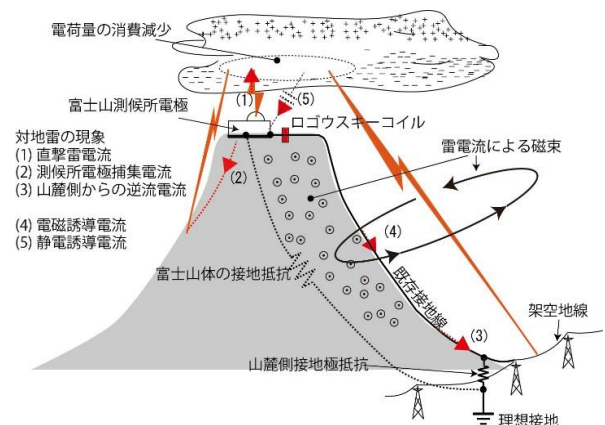


図5 富士山周辺落雷時に測候所と山麓接地極を繋ぐ接地線に流れる電流

地線電位は小さくなるため電流は小さく数十から数百Aになると推測される。また極性は反転することになる。

対地雷以外で、以下の2点がある。

- (4) 四つ目に雷電流が作る電磁束による大きな磁束鎖交循環路の電磁誘導電流である。電磁誘導電流は雷電流に比例した鎖交電磁束の微分変化起電圧を山体抵抗で除した電流になるため、測定した接地線電流を積分した値が落雷電流に比例したものになる。
- (5) 五つ目に測候所の静電誘導電荷変化による静電誘導電流がある。静電誘導電流は雷雲電荷による測候所誘導電荷の変化により接地線に流れる電流である。例えば、雷雲の負電荷が大きくなると測候所の正の誘導電荷は増加する。この電荷は山麓から補給されるため、負の電流として観測される。

観測装置は、これらの複数現象を同時に捉えることが可能である。このことによりより正確に雷現象を解明することが可能になっている。

3.2 雷以外の自然現象

本測定系は、雷以外の自然現象によって生じる接地線電流変化の測定を可能にすることで雷現象以外の観測も可能になる。

山麓側の接地線は送電線架空地線や各鉄塔の接地極と広範囲に繋がっている。また空間域でも富士山体と大きく結合している。そのために接地線電流測定域を直流域まで広帯域に測定可能にして十分な測定感度が得られるようにすることで自然現象に対応する接地線電流変化を捉えることが可能になる。

当初の接地線電流測定は、直撃雷電流測定を意図したが直撃雷は無く、別の雷現象による接地線電流変化を捉えた。このことから別の現象変化による接地線電流変化を捉えられるように測定系を改良し、富士山測候所で五つの現象を観測できるようにしている。

こうした経験から雷以外の自然現象でも接地線電流に変化を引き起こす自然現象はあると考えている。十分な感度、及び周波数測定範囲が得られるようにして発現時刻等に高い相関関係がある測定を可能にすることで実現できると考えている。直流域まで測定可能な方法も採用することで周辺の自然現象変化の測定も可能になるのではないかと推測している。

4. 落雷

4.1 落雷放電路の等価回路

対地雷は、負極性下向き雷の場合、リーダが大地に到達したときリーダの蓄積電荷を中和して流れる。図6はこの等価回路である。Cはリーダの雷放電路静電容量、Lは雷放電路のインダクタンス、Rは大地抵抗になる。高密度の正あるいは負の極性の雷雲からCが充電され、リーダが大地に到達したとき落雷放電スイッチが入ることになる。この回路方程式は以下になる。

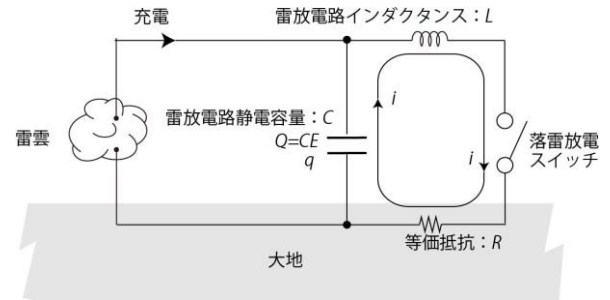


図6 落雷放電の等価回路

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0$$

これを電荷qで書き直すと、 $i = dq/dt$ より、

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0$$

これを解くと

$$R^2 > 4 \frac{L}{C} \text{ の場合, } P = -\frac{R}{2L} \pm \frac{1}{2L} \sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}} = -\alpha \pm \gamma$$

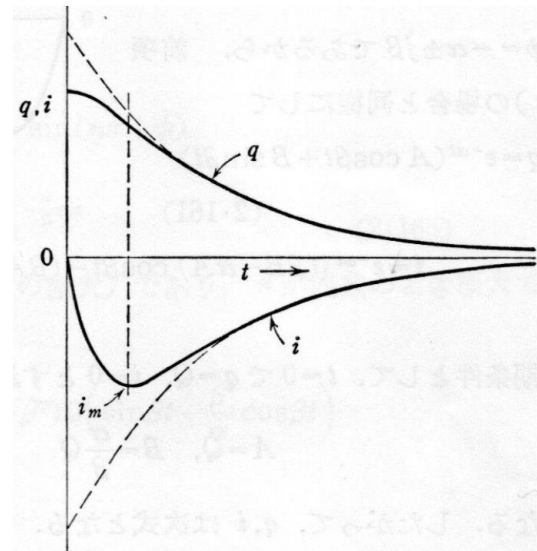


図7 LRC等価回路の放電時のqとi

として

$$q = Qe^{-\alpha t} \left(\cosh \gamma t + \frac{\alpha}{\gamma} \sinh \gamma t \right)$$

$$i = -\frac{2E}{\sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}}} e^{-\alpha t} \sinh \gamma t$$

になる。

絶対値電流の最大値は次式になる。

$$i_m = -\frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \left(\frac{\alpha - \gamma}{\alpha + \gamma} \right)^{\alpha/2\gamma}$$

以上の q と i を図にすると図7 になる。

測定結果でも上向き雷には適用できないが下向き雷は類似した波形になっており等価回路をほぼ満足しているものと考えている。

4.2 落雷電流

落雷電流はリーダの蓄積電荷を中和していくことで流れる。従って、もし単位長さ当たりの蓄積電荷がほぼ同じであれば、落雷電流はリーダ長に比例することになる。例えば雷雲が高い場合リーダ長は長くなると考えられ、落雷電流も大きくなると考えられる。富士山測候所の直撃雷電流は大きいと聞いていたが測定結果では意外と小さい。これは富士山の雷雲が測候所に近く、リーダの総延長は長くないため中和電流も大きくならないと考えられる。リーダを流れる電流は発光強度に比例しているとも考えることができる。例えば、分岐しているリーダは長さが短く、分岐点での発光量も小さくなる。この考えから一般的に大地落雷点の中和電流が最大で発光量も最大になると考えている。

4.3 放電路残存時間

図8 のDSO-3測定系で測定した電流波形は、電磁結合、電極捕集、及び静電誘導の各電流が重畳したものと考えられる。停電時に測定されているため、零相電流の影響は見られない。第1雷撃と第2雷撃の積分値に相似性が見られることから、二重落雷であると考えられる。両者の雷撃間隔は約30msである。この間、放電路プラズマ状態のイオン・電子は再結合によって完全に消滅していないことを示していることになる。

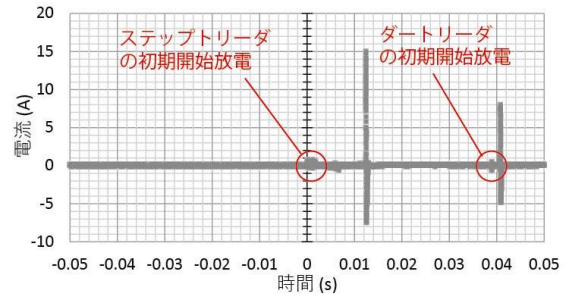
いずれの雷撃にも一般的に観測される初期開始放電が観測されている。前兆現象初期のノイズ状パルスの原因は、図9のように放電路進展前のランダムな多発放電と電離・分極によりリーダに電荷を集めもう一方でステップリーダとして放電が伸びていくものと推測される。

4.4 ステップリーダ

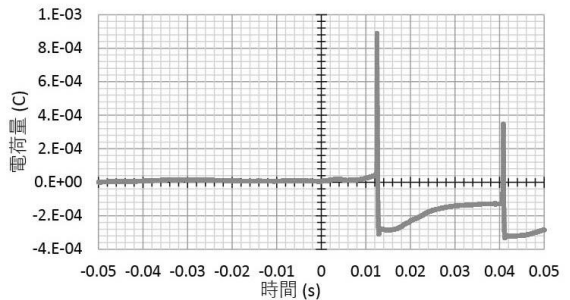
図10(a) はステップリーダと静電誘導による接地線電流変化を測定したものである。ステップリーダによる電流は、リーダと接地線との電磁結合により接地線に流れる電流を測定し、それを積分することでリーダ電流に比例する電荷量として現わされている。

パルス部分が放電により電流が流れてリーダが進展していることを示し、底の部分は放電が止まり、もう一方の放電路端で電荷を集めていることになる。電磁誘導電流の積分値はステップリーダ電流に比例するものであり、そのパルス極性が同じであることは電流方向が同じであることを示している。

図11 はこの過程の負極性下向き雷のステップリーダの単純化モデルの等価回路になる。放電路は導体とみなすことができる。リーダの進展と共に放電路が伸び、雷雲からの電荷補給が間に合わず放電路の電圧低下、従って電界低下により放電が止まる。リーダ放電路は雷雲から電荷補給され、電圧が上昇、従って電界上昇により放電が再開する。同一極性の電荷密度



(a) 接地線電流測定波形



(b) 接地線電流の積分値

図8 2019年7月23日01:23:50に観測された二重落雷

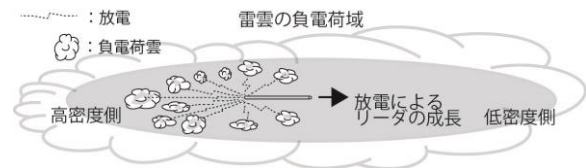
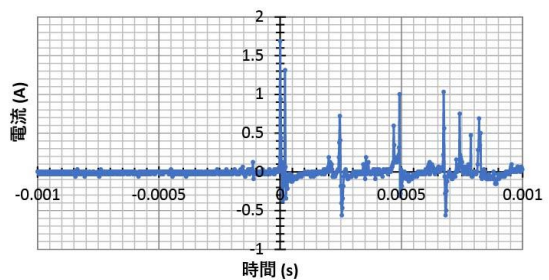
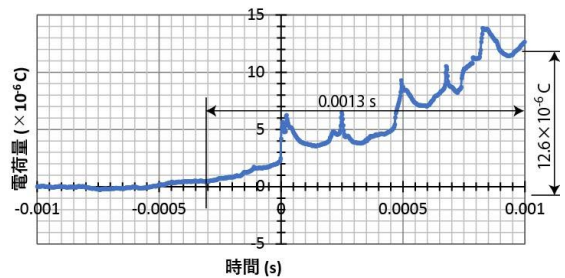


図9 ステップリーダの初期開始放電のモデル



(a) 接地線電流



(b) 接地線電流の積分値

図10 ステップリーダと静電誘導を反映した接地線電流 (at 17:53:14 on July 18, 2017)

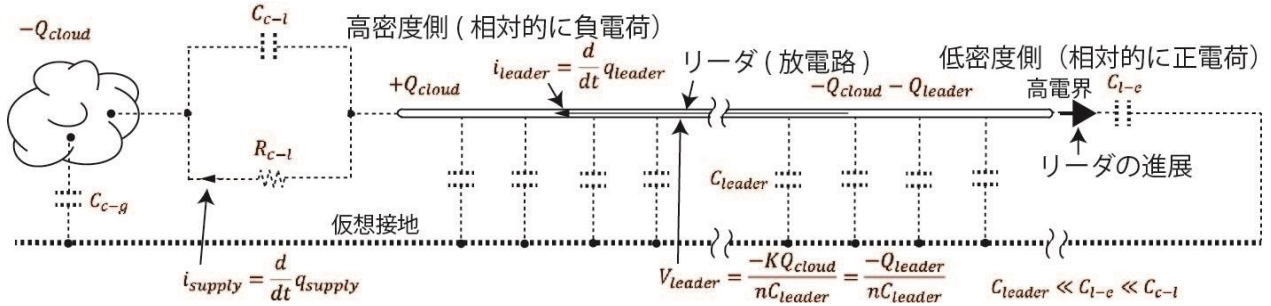


図11 負極性下向き雷のステップリーダの単純化モデルの等価回路

が希薄な方向に高電界が生じ放電路が伸びていく。負極性下向き雷のステップリーダ電流は、低密度側の負電荷進展方向と逆方向になる。高密度側の雷雲からの電荷移動は、ランダムな多数の放電路になり、ベクトル和としての電流は特定方向に成りにくい。

4.5 多重落雷

二重雷の最初の落雷は図12(a)のようにステップリーダが初期開始放電から進展、大地に到達してリターンストロークが生じる。この放電路の導電性は暫く確保され、第1雷撃のステップリーダ起点に (b) に示す第2雷撃のステップリーダが浸入しダートリーダに繋がることで第2雷撃のリターンストロークが生じる。そのため、図8に示される第1雷撃の初期放電からリターンストロークまでの時間よりも第2雷撃の初期放電からリターンストロークまでの時間は小さくなっている。

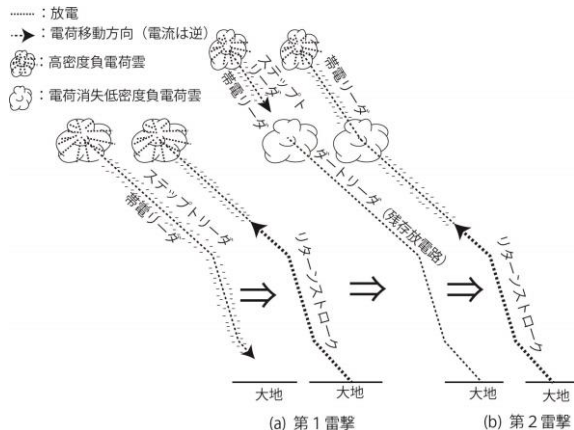


図12 負極性二重落雷発生の仕組み予想モデル

この多重落雷の放電の仕組みは電荷高密度側で複数の大きく帯電したステップリーダが生じていて、それがダートリーダの発生場所に繋がることで多重落雷が生じているものと推測される。

図12に示される二重落雷の場合、1回目のリーダは長い、2回目のリーダは放電路が消滅せずに残っているため成長時間が無い分短くなっていると考えられる。

(1) 負極性上向き二重落雷 (2021年8月18日 10:46:28, 29)

2021年8月18日に図13の二重落雷の測候所直撃雷が観測された。図13(a) が第1雷撃、(b) が第2雷撃である。いずれも観

測された高圧ケーブル内接地線電流である。接地線全体の電流に校正されていない。校正値を2とすれば、全接地線電流は2倍したものになる。

第1雷撃には、前兆現象が見られず、不安定変動を伴って増加する大電流の上向きリーダの可能性が高い。測定電流は測定時間には収まっておらず、測定範囲だけでも第2雷撃よりも大きな電荷量の落雷である。大電流のリーダは他の観測でも見られることから富士山のように単独峰で雷雲が近く、大きな気

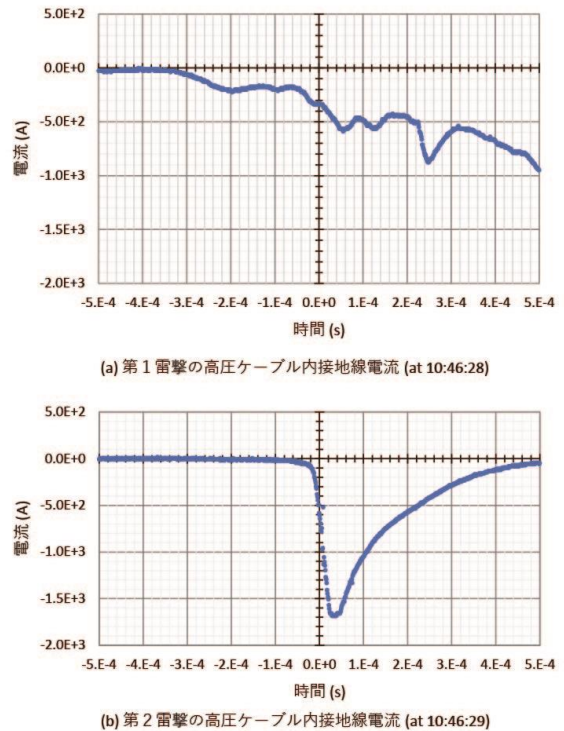
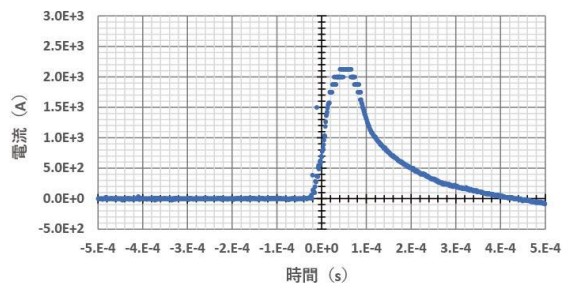
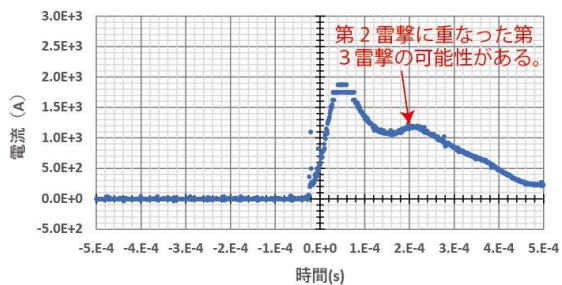


図13 測候所負極性上向き二重雷 (on August 18, 2021)

流変化が伴うことによる高電界が生じ、山麓から接地を取っていることで成長に必要な電荷補給も得られるという富士山測候所特有の現象の可能性があると考えている。第2雷撃は第1雷撃の放電路をダートリーダとしたステップリーダのリターンストロークと考えている。



(a) at 13:46:12 on July 26, 2022



(b) at 13:46:12 on July 26, 2022

図14 正極性下向き二重落雷

(2) 正極性下向き雷 (2022年7月26日 13:46:12)

2022年7月26日に図14の二重落雷の測候所直撃雷が観測された。正極性下向き雷の二重雷である。(b)の第2雷撃には減衰域にコブがあり三重雷が重畳したものと考えられる。

4.6 上向き雷・下向き雷

測候所での上向き雷の発生条件は、①上向きリーダの発生条件として高電界があり、②成長条件として十分な電荷補給ができる必要がある。前者は、測候所が3776 mの高さにあり雷雲近くで高電界が生じ易くなっていると考えている。後者は山麓の接地抵抗は小さく、接地線の電流容量も大きい。測候所ではこの2条件を満たしている。図13(a)の第一雷撃はこうした条件で生まれたものと推測される。上向き雷は上向きリーダ発生点が落雷位置になる。見方によっては落雷点を制御できる落雷ということになる。

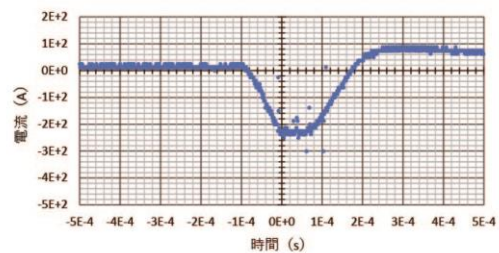
下向き雷は測候所周辺の電界の影響を受けて進展方向が決まり、必ずしも測候所被雷とはならない。測候所近くになると高電界によりリーダが発生成長し、避雷針が伸びる効果が現れると考えている。確実とはならないが、測候所ではある程度制御できる落雷ということになる。

落雷位置が定まるということは落雷が必要な実験研究、及び落雷保護にとって好都合な条件になる。

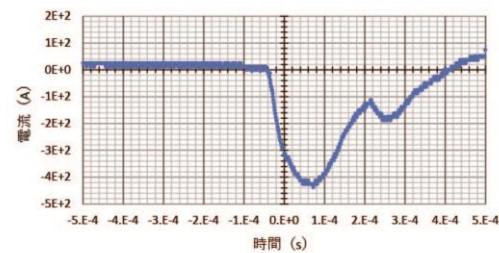
5. 2023年に観測された測候所直撃雷電流

(1) 大電流測定系測定結果

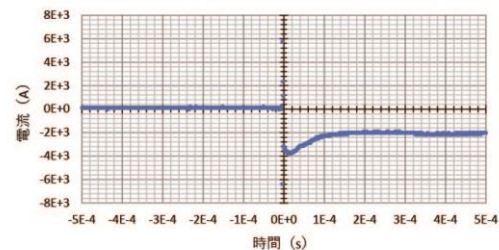
DSO-1測定系で観測された接地線電流波形である。図12に示す波形が8月1日に観測された3回の波形である。1回目負極



(a) 1回日落雷 (at 01:44:41.5 on August 1, 2023)



(b) 2回日落雷 (at 16:41:12.1 on August 01, 2023)



(c) 3回日落雷 at 16:41:12.1 August 01, 2023

図15 2023年8月1日観測波形

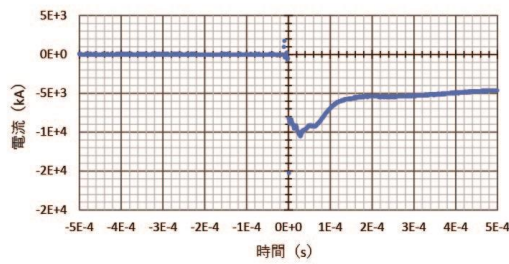
性240 Aと2回目負極性400Aで電流は小さく、立ち上がりがなだらかであるため、測候所電極捕集電流の可能性はある。2回目の立下り部に見られるピークは第1雷撃に第2雷撃が重畳したものと考えられる。2回目の直撃雷電流測定は停電時に測定されたものである。2回目には前兆現象測定用のDSO-2測定系で200 ms前に前兆現象が観測されている。他の直撃雷では前兆現象は観測されていない。2回目と3回目は同一時刻であるが3回目が2回目の後、100ms以内に生じたものになる。3回目は正のピーク10 μsパルス幅の6 KAのインパルスがあり、そのアンダーシュートで負の4 kAのピークが観測された。何故このような波形が観測されたのか検討しているがまだ不明である。

8月3日にも三つの負極性直撃雷があった。1回目の直撃雷後、約8分後に2回目、その約1分後に3回目の直撃雷があった。時間間隔から多重雷ではなく、活発な雷雲活動に曝されていることにより生じた間隔が短い直撃雷と考えている。

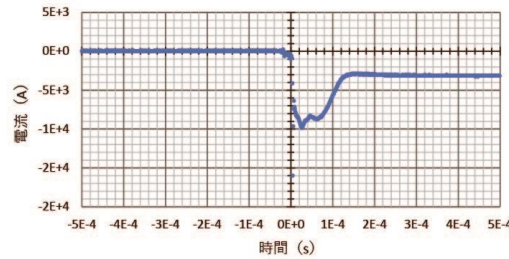
測定波形は等価回路から予測される波形にノイズが重畳しているように思われる。総観測数は1万を超えておりまだ処理きれない状態である。

(2) 時刻校正

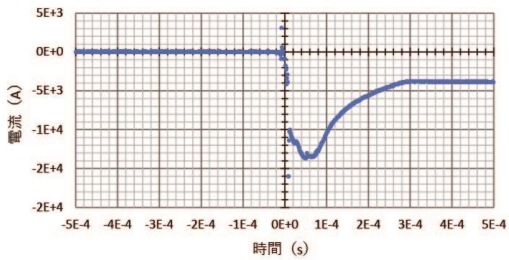
他の落雷情報との比較のため、時刻校正は重要である。JST



(a) 1回目落雷 (at 16:20:36.7 on August 03, 2023)



(a) 2回目落雷 (at 16:28:13 on August 03, 2023)



(a) 3回目落雷 (at 16:29:08 on August 03, 2023)

図 16 2023年8月3日観測波形

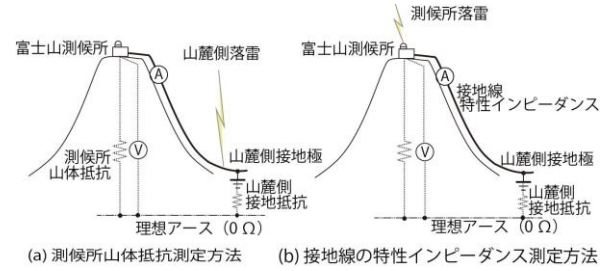


図 17 富士山測候所山体抵抗及び山麓に繋がる接地線特性インピーダンス測定方法

時刻校正は1週間おきに時刻補正したGPSカメラDSOの時刻表示画面を撮影して得た校正時刻差を一次近似して補正した。

DSOの表示時刻は、トリガーがかかって可否判定して結果が出てからUSBメモリーに記録された時刻である。トリガー時刻ではない。測定時間が長いDSO-2以外はトリガー時刻との差は小さい。

6. 富士山体抵抗・接地線特性インピーダンスの測定

雷現象を理解する上で富士山体抵抗、及び接地線特性インピーダンスを知ることは正確な雷現象の解明に必要な情報である。

測候所富士山体抵抗と山麓と繋がる接地線の特性インピーダンスの測定は、図17の方法で行う。①山体の接地抵抗は山麓側落雷による測候所接地極電位を測定できるようにして、その電位が加わった時に流れる電流を同時に測定し、前者を後者で除することで求められる。②山麓に繋がる接地線の特性インピーダンスは、

測候所直撃雷被雷時の測候所電圧と接地線電流の比から求める。

接地線電流測定は雷現象観測に使用している電流測定系を流用している。山麓接地に対する測候所接地極の電位は、電位測定線として測候所の高圧電源引込線を流用することで山麓電位に対する測候所接地極電位が求められるようにして測定できる。電源線に絶縁

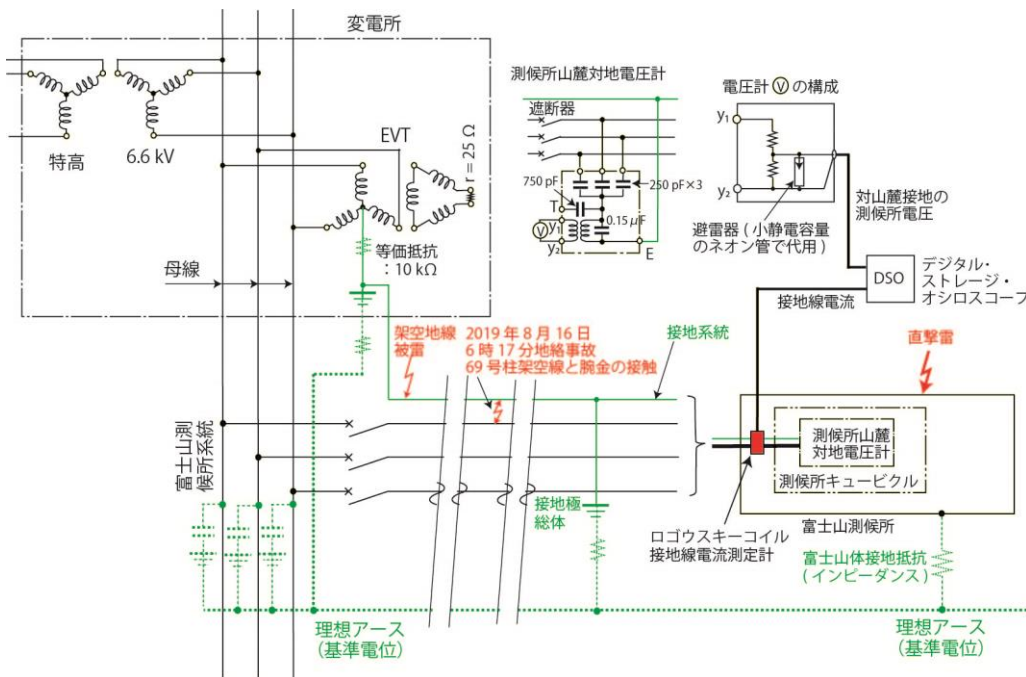


図 18 接地線電流と山麓接地に対する測候所接地極の電圧を測定する具体的測定系

不良が無ければ零相電圧は0 Vになり電源電圧の影響は受けない。山麓側の電源線の大地との静電容量によって接続され、測候所接地極電位が求められる。

7. おわりに

以上をまとめると、

- (1) 電気回路的に見て雷現象の解明をはかった。
- (2) 雷現象についての等価回路を提案した。
- (3) 2023年の直撃雷観測結果について報告した。
- (4) 測候所の富士山体抵抗と接地線の特性インピーダンスの測定方法を提案した。

富士山での観測を積み重ねることで、富士山の雷現象の特徴も正確に知ることができるものと考えている。継続した観測が必要である。

今後は、落雷以外の自然現象の測定を可能にするため、測定器のオフセットを小さくし測定周波数帯域を直流域まで伸ばすことが必要である。

測定数は多くなるため、データ処理できる工夫、対策が必要である。

8. 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、接地抵抗測定にご協力頂いた関電工、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る。

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) 北村覚一(1973年), 基礎過渡現象論, 昭晃堂
- 17) 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.
- 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
- 20) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 伊高健治, 鈴木智幸, 林真彦, 土器屋由紀子 (2022). 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, 第15回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 29-36.
- 21) 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, 67-79
- 22) 安本勝, 土器屋由紀子, 鴨川仁, 佐々木一哉 (2023), 富士山の雷現象観測から見えるリーダの特徴, 日本大気電気学第101回研究発表会, P1-13
- 23) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子, 鈴木智幸, 村田浩太郎 (2023), 富士山頂の雷測定で見える雷現象, 第16回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 21-30.

2023年度における富士山における全磁力・地震データ解析の進捗状況 (SR05)

長尾年恭^{1,2}, 鴨川 仁¹, 上嶋 誠³, 楠城一嘉¹

1. 静岡県立大学グローバル地域センター, 2. 富士山環境研究センター, 3. 東京大学地震研究所

1. はじめに

最後の富士山噴火は約300年前の江戸時代の1707年の宝永噴火である。一方、5,600年前から今までに噴火した回数は180回を超えており、平均で30年に1回噴火していた事もわかっている。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%確実と考えられている。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。

2. 地磁気観測の状況

現在、富士山には火山監視を目的として、微小地震観測やGNSS地殻変動観測が気象庁や国土地理院、防災科学技術研究所等により行われている。火山噴火予測の高精度化のためには、原理的にマグマの上昇を捉える事のできる地磁気観測が有用であるが、残念ながら地磁気観測は富士山ではごく一部でしか行われていない。そこで本NPOのファシリティを用いて、山頂ないし山腹で地磁気観測を行うべく、まず御殿場口新五合目の太郎坊に2020年10月に最初の全磁力観測点を設置した。2021年度には太郎坊周辺の電磁環境調査や、LPWA (Low Power Wide Area) 通信を用いたデータ表示システムの作成、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の雛形を作成した。2022年度夏も、コロナによる影響がまだ大きく残っており、山頂での活動が100%コロナ前に戻ったと言えない状況であった。そのためまずは将来の山頂付近での観測点候補地選定作業を8月に実施した。具体的には山頂から宝永火口周辺にかけて徒歩で鉛直方向の全磁力勾配を計測し、電磁環境を評価し、八合目付近にも観測点候補地となりうる地点がある事を確認した。2023年度は、マグマ上昇のモデル計算を行ない、現在の火山性地震の発生地点を勘案し、そこからマグマが山頂およびそのまま上昇した場合について、いずれのケースも静岡県側五合目付近で、かなり効率的にマグマ上昇による地磁気変化を捉えられる事が判明した。

もし五合目付近で観測ができれば、山頂ないし八合目付近では物理的に研究者は年に2ヶ月ほどしかアクセスできないのに対し、五合目近傍であれば、年のうち8ヶ月ほどはメンテナンスが可能となり、2024年度から五合目近傍に、太郎坊に次ぐ二番目の観測点設置を計画している(図1)。

3. 地震データ解析

地震観測については、富士山深部のマグマ活動と関係が指摘されている低周波地震を対象として研究を行なっている。低周波地震は通常の地震に比べ、ゆっくりとした揺れを生じる地震である。また、富士山で起きる低周波地震の規模は非常に小さいため(マグニチュードM=-1~2)、観測された揺れのデータに含まれるノイズに埋没して地震と認識されない低周波地震が存在する。そのため、雑音の中から地震動を検知

するマッチドフィルタ法を導入した。2003年1月~2019年7月に富士山周辺の16観測点で記録した揺れのデータの中から、気象庁が観測した低周波地震の波形と調和する波形をデータ処理で抽出した。その結果、雑音に混じるなど、気象庁が観測できていない低周波地震を検出する事に成功した。これまで低周波地震を約6,000回検知し、これは同一期間に気象庁が検出した地震回数の約3倍であった。

2011年3月11日東北沖地震(M9.0)の4日後に富士山麓で発生した静岡東部の地震(M6.4)の後、火山性微動は観測されず低周波地震活動は静穏と気象庁から報告され、すぐに富士山噴火につながる事は無いと当時判断された。我々は地震活動を予測・評価するETAS (Epidemic Type Aftershock Sequenceの略)モデルを用いて解析した結果、静岡東部の地震により活動が活発化していたことを見出した(図2)。さらに活動レベルは静岡東部の地震前のレベルに戻っておらず、富士山のマグマシステムが変化したことが示唆された。この結果はすでに学術雑誌¹⁾に掲載された。

参考文献

- 1) Nanjo, K. Z., Yukutake, Y., & Kumazawa, T. (2023). Activated volcanism of Mount Fuji by the 2011 Japanese large earthquakes. *Scientific Reports*, 13 (1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37735-4>

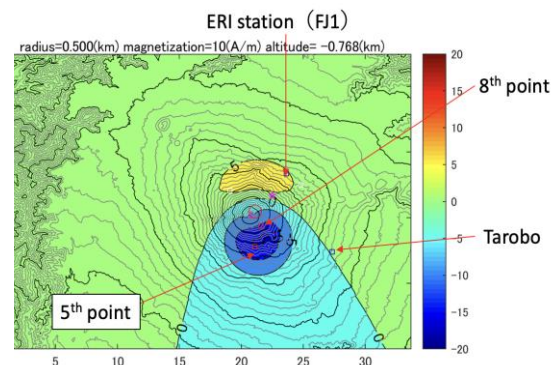


図1 モデル計算により、静岡県側五合目近傍がマグマ上昇による全磁力変化を捉えるのに適している事が判明した。モデルは半径500mの球状の高温の領域(マグマ溜りを想定)が、山頂へ向けて上昇するものとした。上図は海拔 - 0.768kmに球の中心が到達した時の地磁気変化である。2024年度以降、図中の5th pointと示される近傍で、新規全磁力観測点の構築を目指す予定である。

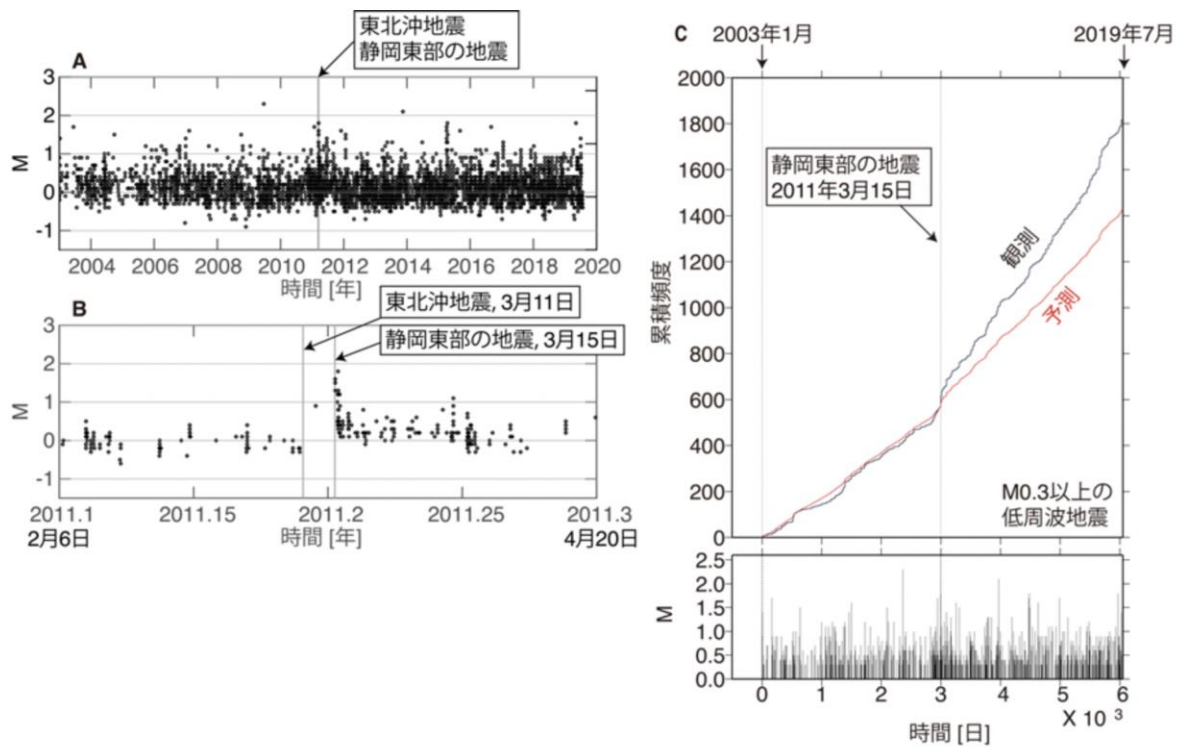


図2: 富士山の低周波地震

- (A) 低周波地震のマグニチュード(M)を時間の関数としてプロット. 縦線は2011年に起きた東北沖地震(3月11日)と静岡東部の地震(3月15日)のタイミングを示す.
- (B) これらの地震の前後に注目した図. 2月6日(2011.1年)~4月20日(2011.3年)の低周波地震を使用した. 静岡東部の地震の直後に低周波地震が起きている.
- (C) 上パネル: 2003年1月~2019年7月の $M \geq 0.3$ の低周波地震の累積頻度を”観測”と呼ぶ(黒線). ETASモデルの累積頻度を”予測”と呼ぶ(赤線). 予測は, 静岡東部の地震(2,995日の縦線)までの観測にETASモデルをフィットさせ, その後外挿したもの. もし同地震前後で変化がなければ, 観測(黒線)と予測(赤線)はほぼ重なるはずだが, 同地震後に活動が活発化したため観測(黒線)は予測(赤線)より上方に逸れている. 下パネル: Mの時間変化.

2023年度の富士山頂教育用高精度ドーム映像制作プロジェクトについて (SR06)

○宮下 敦¹, 鴨川 仁², 尾久土正己³

¹成蹊大学, ²静岡県立大学, ³和歌山大学

1. はじめに

筆者らは、富士山頂施設を利用した高精度教育用ドーム映像の撮影を目指し、テストを重ねてきた¹⁾。全周映像あるいはドーム映像の場合、撮影した地点から見えたり聞こえたりするものを、ほぼ全て記録しており、視聴者はそこにいた人(もの)と映像や音声の記録を共有し、自分の見たい方向や範囲を主体的に選択することができる。本プロジェクトは、富士山頂の空の景色全体をそのまま教育現場に持ち帰り、視聴者が体験したり、観察したりすることができる高精度ドーム映像の教材化を目標としている。

2. 2023年度の実施状況

COVID-19感染症対策が緩和された本年度は、目的としていた富士山頂での動画撮影に成功した。2023年8月1日～2日は宮下が、同8月16日～8月17日は鴨川が中心になって撮影を行った。

撮影場所は、測候所北側の3号庁舎屋外テラス部分とした(図1A)。庁舎のより高所に設置するとランドマークがなく、富士山頂であることが分からなくなってしまうため、南側と西側に庁舎が写りこむ画像(図1B)になるようにしている。

撮影機材は、成蹊大所有のInsta360 RSを用いた。この機材は6Kの精度で、昨年度まで用いていた和歌山大所有の8K機材(Insta360PRO)よりも画素数が少ないが、運搬しやすく耐久性も高い。撮影した3秒毎のタイムラプス画像等の動画素材は約1800ファイル、40GBの容量となった。あわせてバックアップ用として、個人所有の4K精度のInsta360x2、および魚眼レンズ(Canon EF 8-15mm)をつけたフルサイズ1眼カメラ(Canon 1DX)によるタイムラプス画像も撮影した。

Insta360で撮像した画像は、SIZIMA Soft製のEqtant Free²⁾を用いて、mp4フォーマットのドーム用映像に変換した。

3. 考察

COVID-19のために難航していた本プロジェクトであるが、ようやく富士山頂での撮影とドーム動画作成を実施することができた。実際のドーム投影での観察は未だであるが、富士山頂での激しい雲の動きは迫力があり、また、その変化は気象現象の激しさをよく示していて、自然科学教育教材として優れていることが分かる。

今回は、まず映像を作成することを目的に活動したが、課題は多いことも分かった。2023/8/1-8/2の撮影では、山頂付近で発雷し、生活防水対応の機材であったため、撮

影途中で撤収する必要があった。また、バッテリー容量が小さく、フル充電でも約2時間分のタイムラプス画像しか取得できなかった。これは30fps動画で25秒分の長さにはならない。この精度で10分の教材動画を作成するためには、約40時間の撮影が必要になる。夜間の星の動き教材撮影のためにも、撮影機材を避雷と耐候性の高いハウジング中に格納し、連続撮影するための電源を持たせる必要がある。また、学校現場の一般の教室や病院内学級等で教材として用いるためには、組み立て式で可搬型ドームと、4K以上の精度の小型プロジェクター+魚眼レンズといった投影システムが必要になる。次の活動では、この問題の解決が前提になると考えられる。

引用文献

- 1) 宮下 敦, 鴨川 仁, 尾久土正己, 中山文恵, (2022). 2022年度までの富士山頂教育用高精度ドーム映像制作プロジェクトについて. 第16回成果報告会講演予稿集, 42-43.
- 2) https://sizima.com/eqtant/EQTANT_jp.html. 2024/2/8 最終閲覧.



A. 撮影機材と設置状況



B. 作成したタイムラプス画像素材 (2023/8/17 撮影)

図 1

限界建築の空間、工法、材料の変遷 —富士山測候所を例に— (SS01)

望月颯希¹

1.法政大学デザイン工学部建築学科

1. はじめに

富士山測候所は極限の環境で生活することを可能とする先駆的建築であるにも関わらず、建築の通史的研究の対象とはなっていない。局所的には、石室の研究(奥矢・大場(2018))やプレハブ工法についての学術雑誌(「月刊建設」ほか)に詳しい。

本研究は人間が住むに適さない限界の土地に、どう住空間をつくってきたかを明らかにし、厳しい気象条件の中、生活を可能にしてきた建築の空間、工法、材料的工夫を明らかにすることを目的とする。

2. 富士山頂での観測と建築の歴史

最初の富士山頂測候所の建設計画は、世界初の高山通年観測を達成するためにはじまった。計画としては1887年のE.Knippingが復命書に添えたものが最も古いもので、壁体を厚くした石室に近い構造を想定している。石室構造に関しては、スコットランドのBen Nevis観測所にも共通点を持ち、野中小屋や佐藤小屋で実際に用いられた。

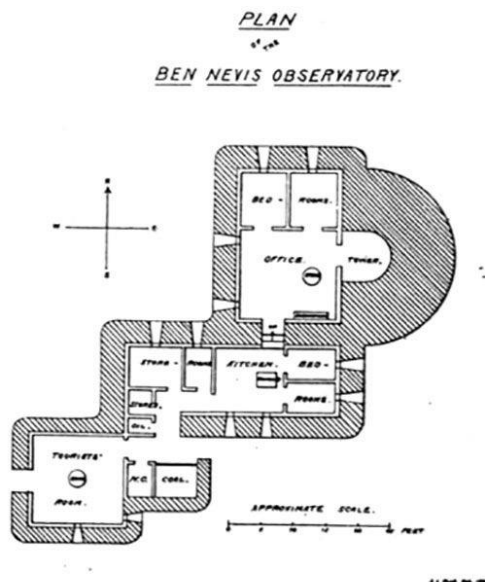


図 1 スコットランド・Ben Nevis観測所の平面図¹⁾

富士山観測史における重要な建築の転換点は2つあり、1つは1895年の越冬観測挑戦の後の野中至や佐藤順一による観測所についての研究と実験的建築。もう1つは大成建設が担当した1964年のレーダー設置と1970年の新庁舎建設で、

まったく新しい建築を建てた革新的建築である。

3. 高所観測作業に特化した建築の工夫

限界の土地での建築は、環境に定義される制限の中で設計されるものなので、建築の運用によって多くの工夫が付加されてきた。

3. 1. 空間上の工夫

富士山頂は限られた広さしかないため、不必要に物資をため込んだりすることはできない。岩石質の地盤を造成することもできなかったため平坦で広い敷地が確保でき、温かく風も穏やかな東安河原と、より正確な上層風観測が可能な剣ヶ峰に建設された。

最小限空間で設計する中で、野中は1895年の最初の越冬観測で狭く運動のできない建物だと運動不足、免疫低下、血行不良などで生存に関わるとして、屋内で運動できる広さを確保してきた。

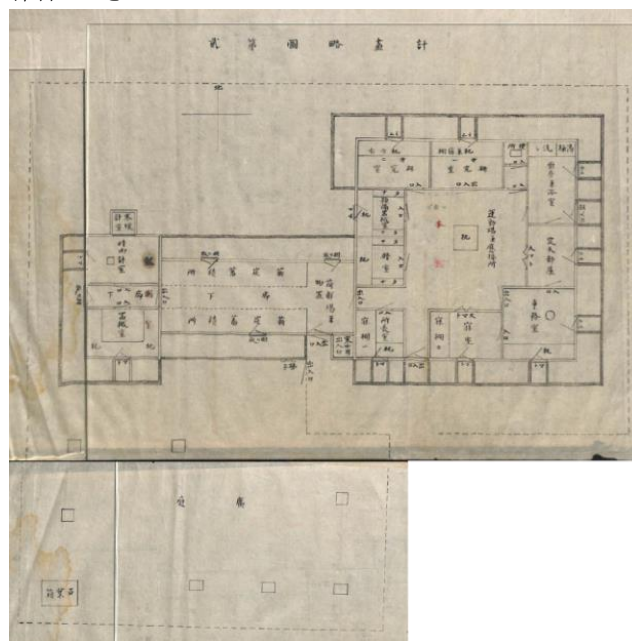


図 2 富士山観測所計画略図²⁾

3. 2. 工法上の工夫

限界の土地にはその地に適した工法が編み出される。

一つは野中が設計した1898年の富士山観測所計画略図(実物としては1912年の野中倉庫)で示された、将棋の駒のような断面形状で、耐風、避雷に抵抗できる形態として石室を応用させたようなものを開発した。

もう一つは大成建設が手掛けた1964~1970年の建築で、プレハブ工法や輸送技術の進歩によってまったく新しい最先端技術を富士山頂で実現させた。

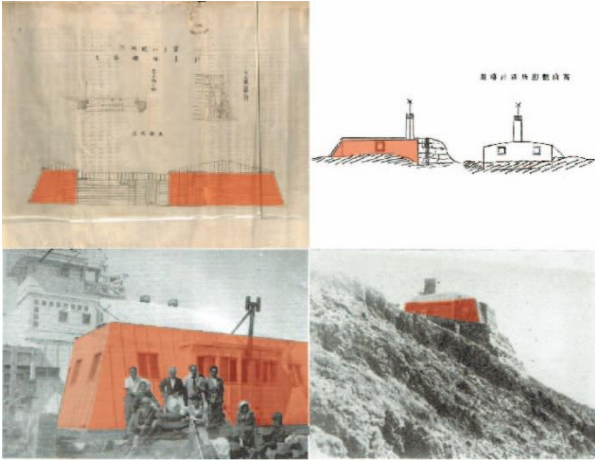


図3 将棋の駒型の断面を持つ建築の例³⁾

3. 3. 材料上の工夫

富士山頂への輸送コストを考えると、当然多くの建材を運ぶことは不可能である。近世初期から登拝のために建築された石室のように基本的には現地調達の基本で、現地の火山岩のほかは軸組材の木材、避雷のための外壁のトタンが材料のほとんどを占めた。断熱なども間取りで対処し、馬方と強力が運べる大きさと量での建築となっていた。

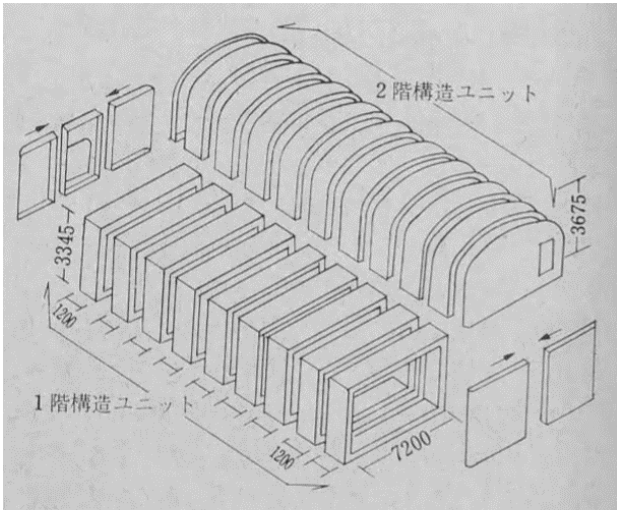


図4 新富士山庁舎のユニット分割図⁴⁾

1964年のレードームはジュラルミンのフレームとFRPのパネルで構成されている。また1970年に竣工した新富士山庁舎ではプレハブ工法が取られたため、躯体の材料はアルミ合金が使われた。ここでも戦前戦後の技術発展の大きさを見ることができる。

4. おわりに

富士山頂の建築は厳しい環境から人間を守るシェルターの意味合いが強く、断面形状の類似性からもその事実は明らかである。しかし、本研究でわかったのは建築のデザインの根拠が環境にのみ依拠するのではないということだ。

環境以外の要因として、まず観測機器の変化が挙げられる。1964年のレーダー設置時にジオデシックドームのレーダードームが印象的だが、気象観測機器以外にも大気化学、無線工学の機器の発展により建築の広さ、断熱や防湿性能が向上した。

また、観測体制によっても平面が変化し、夫婦のみで観測した野中小屋、運動空間を設け数人で滞頂観測をした佐藤小屋・昭和7年7月庁舎、交代で観測を行い科学者の出入りも増えた新富士山測候所のそれぞれで、個室の確保など集団で過ごす工夫がみられた。

富士山頂のような限界の場所の建築でもさまざまな要素が絡み合っており、歴史の中で建築が変わっていた。なかでもレーダーを設置したことを契機に観測建築はプレハブに置き換わり、大きな転換点であった。この材料とその運搬方法の転換前後でも変わらなかった(のちに必要性を再評価された)要素を整理して、将棋の駒型断面、最小限土地での運動空間の確保が普遍的限界建築的特徴であるということが明らかになった。

参考文献

- 1) Ben-Nevis.com <https://ben-nevis.com/information/history/observatory/observatory.php>
- 2) NPO 富士山測候所を活用する会、野中至(到)・千代子資料館 <https://nonaka-archives.jimdo.com/> 資料番号 M010
- 3) 前掲参考文献2)(左上)
佐藤順一(1907) 日本ノ高山観測. 気象集誌, 26, 1, 24 (右上)
長谷川敦(2023) よこそ! 富士山測候所へ —日本のてっぺんで科学の最前線に挑む. 旬報社, 25(左下)
中島博(1995) カンテラ日記: 富士山測候所の五〇年. 筑摩書房, 22(右下)
- 4) 今村昭宏(1974) 富士山測候庁舎の計画(その1). 月刊建設, 18, 10, 26

猛暑だった 2023 年の夏:富士山頂では？ (SC01)

皆巳 幸也^{1,2}, 鴨川 仁^{1,3}, 林 真彦¹

1.認定NPO法人富士山測候所を活用する会, 2.石川県立大学, 3.静岡県立大学

1. はじめに

2004年8月26日以降、富士山頂では気象庁による(無人での)観測が気温や日照時間など一部の項目に限定して継続されています。しかし、風向・風速や降水量など大気科学観測では必須とも言える項目は含まれていません。そのため、認定NPO法人富士山測候所を活用する会(以下「本NPO」)では独自の事業として、これら項目も含めた気象観測を夏期には実施しています。また、そうしたデータの解析を研究の一つとして実施することも目論んでいます。

本発表では、まず平地を含めた富士山域が昨年ほどどんな夏だったのかを見たうえで、では富士山頂はどうだったのか、ご報告します。成果報告会にご参加いただいたみなさまには、本NPOの事業を知っていただくとともに、このあとの発表をお聞きになる際の参考にもしていただければ幸いです。

2. メチャクチャ暑かった2023年夏

表1は、東日本の太平洋側における2023年7～8月の天候の特徴を、それぞれ上・中・下旬に分けて気象庁がまとめたものです。昨年の夏と言えば、とにかく暑かったという印象をお持ちの方が多くと思われます。表1でも、7月上旬は気温が「高い」(統計的に上位3分の1)であり、以降は8月いっぱいまで「かなり高い」(同じく上位10分の1)となったこと、また日照時間も「多い」や「かなり多い」となった期間が多いこと、そしてトピックスにあるとおりこれらの原因として太平洋高気圧の勢力が強かったことが、昨夏の特徴として挙げられます。余談ながら、太平洋高気圧の勢力は日本海側にまで及び、南風によるフェーン現象もあって8月上旬にはその日の全国での最高値として40℃にも達する気温が石川県や福井県で観測されることもありました。

次に、富士山麓での例として、御殿場AMeDASにおける7月・8月の日降水量を図1に示します。昨夏は、台風や前線、

表 1. 東日本の太平洋側における 2023 年 7～8 月の天候(気象庁による)

	7 月			8 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
トピックス	梅雨前線 太平洋 高気圧	線状降水帯	太平洋 高気圧	太平洋 高気圧 台風6号	太平洋 高気圧 台風7号	太平洋 高気圧
気温	高い	かなり高い	かなり高い	かなり高い	かなり高い	かなり高い
降水量	平年並み	少ない	かなり少ない	多い	多い	平年並み
日照時間	多い	多い	かなり多い	平年並み	多い	多い

また大気的不安定による大雨はあったものの、日降水量が

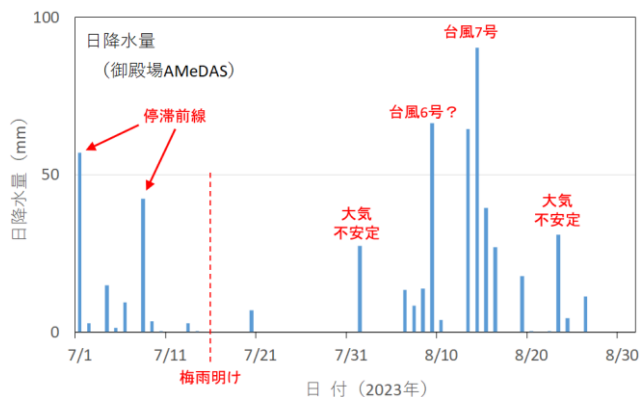


図1. 御殿場AMeDASの日降水量と大雨の要因 (2023年7～8月)

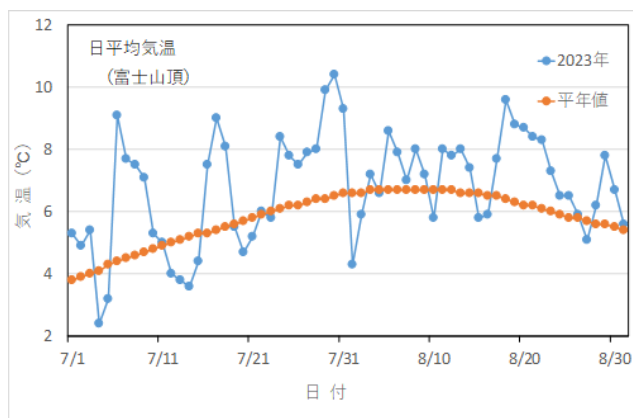


図2. 富士山頂での日平均気温 (2023年7～8月)

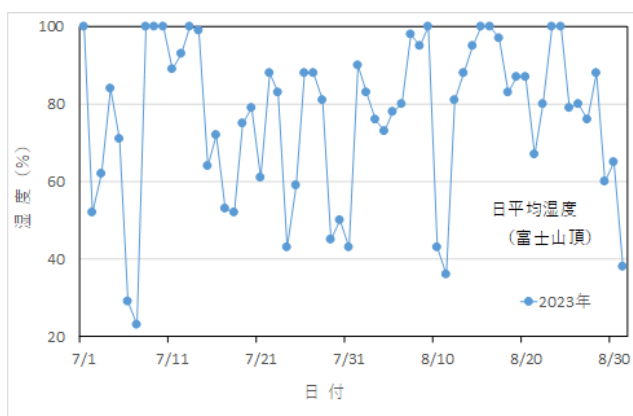


図3. 富士山頂での日平均湿度 (2023年7～8月)

100mmを超えることは無く、2021年(最大329.5mm)や2022年(同125.5mm)には及びませんでした。

3. 地上よりは穏やかだった(?)山頂

山頂では、気象庁が通年で気圧、気温、露点温度、水蒸気圧、湿度を、また夏期には日照時間を観測しています。その結果のうち、ここでは2023年7~8月に観測された気温と湿度を、いずれも日平均値としてそれぞれ図2と3(前ページ)に示します。

気温は山頂でも総じて高く、平年値を上回る日は多くなりましたが、前年のように平年値を下回る日がほんの数日しか無いような状況には至りませんでした。一方、湿度は前年とは違って60%を下回る日がたびたび現れ、気温が低いにも関わらず湿度も低いという、上層からの下降を示唆する事例が前年にも増して多く見られました。

本NPOでは、夏期観測中の一部期間に限定されますが

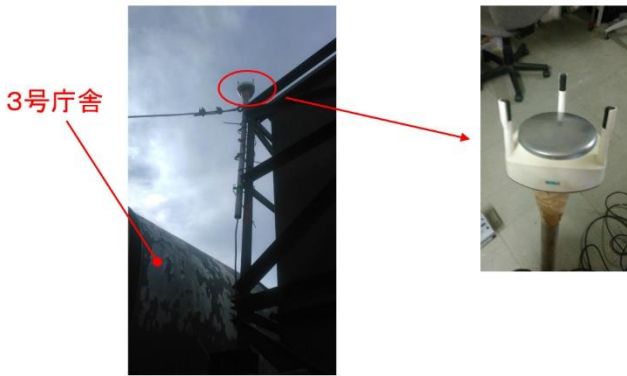


図4. 気象測器の設置風景とセンサー部分の拡大写真

山頂で降水量と風向・風速を観測しています。その強みは、対象とする要素が増えることに加えて、1分ごとのデータとしてロガーに記録していることもあります。なお、その観測ではVaisala社の複合気象センサーCVS-WXT530を使用しました。その設置風景を図4に示します。

観測結果の一例を図5に示します。図は、昨夏にデータが得られた全期間の風速を、1分値の推移として表したものです。

図1で示したとおり、8月の上・中旬には台風が接近し、下界で(2023年の中では)大雨が降ったことに対応して、山頂でも風は強まりましたが、それもせいぜい12m/sに留まるという、意外に(!?)小さいものでした。その程度で済んだ原因の考察は今後の課題です。

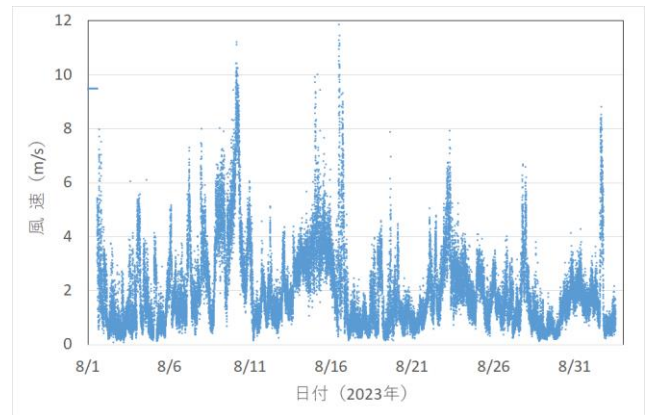


図5. 富士山頂での風速
(1分値, 2023年8月1日~9月2日)

富士山頂でPM2.5, 雲, 雪からマイクロプラスチックを発見！ (SR09)

○大河内博¹, 谷悠人¹, 王一澤¹, 小野塚洋介¹, 速水洋¹, 新居田恭弘², 皆巳幸也³, 勝見尚也³, 竹内政樹⁴, 加藤俊吾⁵, 和田龍一⁶, 鴨川仁⁷, 長門敬明⁸, 横山勝彦⁸, 鳴海玄希⁸, 岩崎洋⁸, 三浦和彦⁹, 廣瀬勝己⁹, 土器屋由紀子⁹, 畠山史郎⁹
 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 静岡県立大学, 8 NPO富士山測候所を活用する会, 9富士山環境研究センター

大気中マイクロプラスチックを調べるのはなぜ？

ヒトは1日に2万回以上の呼吸をし、約20kgの空気を吸っています。空気にマイクロプラスチック (Airborne microplastics; AMPs) が含まれていれば吸い込みます。肺胞まで運ばれると長期間体内に留まり、有害化学物質が体内に溶け出します。ナノプラスチックは血液によって全身に運ばれます。

上空にAMPsが運ばれると、強い紫外線によって劣化してメタンなどの温室効果ガスを放出したり、太陽光を吸収・散乱して温暖化や冷却化に関与します。プラスチックは水を弾きますが、劣化すると水を付着しやすくなり、AMPsが雲を作る核になることも指摘されています。雲は太陽光の吸収や散乱に影響を及ぼします。AMPsがゲリラ豪雨を降らして、災害を引き起こすかもしれません。さらに、AMPsが大気を通じて極域に運ばれて蓄積すると、脆弱な極域生態系破壊を引き起こす可能性があります。しかし、AMPsの健康・環境影響は可能性が指摘されているだけで実態は不明です。

富士山頂で大気中マイクロプラスチックを調べるのはなぜ？

地上に近い大気は対流圏と呼ばれています。対流圏下部は大気境界層、高度2500mを越える上空は自由対流圏に分類されます。自由対流圏は遮るものがないので風が強く、大気汚染物質が運ばれにくいので空気は綺麗です。ただし、低気圧や夏季日中の強い上昇流によって地上の大気汚染物質が自由対流圏大気まで輸送されると、地球規模汚染を引き起こします。日本上空には偏西風が吹いており、大陸から放出された大気汚染物質が運ばれてきます (図1)。

つまり、自由対流圏にある富士山頂でAMPsが見つければ、大気を通じた全球的なマイクロプラスチック汚染が起きていることが分かるのです。私達は富士山頂で夏季にPM_{2.5}と雲、春季に積雪の採取を行ってAMPs分析をしています。

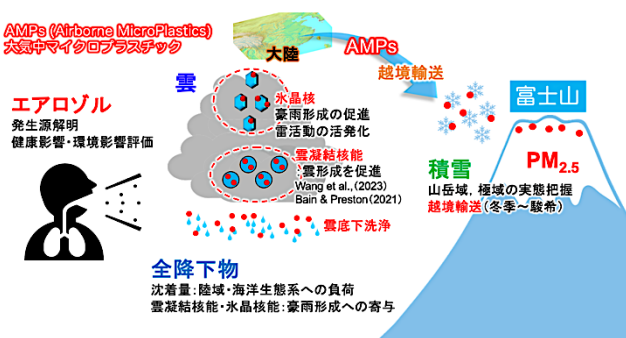


図1 富士山で大気中マイクロプラスチック研究を行う意義

富士山頂で見つかった大気中マイクロプラスチックの正体

図2には富士山頂で採取したPM_{2.5}, 積雪, 雲水のAMPsの組成を比較しています。PM_{2.5}と積雪に含まれるAMPsの主成分はポリプロピレン (PP), ポリエチレン (PE), ポリエチレン・ポリプロピレン共重合体 (PE/PP) など水を弾きやすいプラスチックが50%以上を占めていました。一方、雲水では水を弾きやすいプラスチックの割合は低く、ポリエチレンテレフタレート (PET), ポリカーボネート (PC), ポリアミド (PA; ナイロン6, ナイロン66), ポリウレタン (PU) などプラスチックの中では水に濡れやすいプラスチックの割合が多いことが分かりました。ただし、積雪と雲水から検出されたポリプロピレン (PP) は、都市部の新宿で採取したPM_{2.5}に含まれるポリプロピレン (PP) よりも著しく劣化しており、水で濡れやすくなっていました。

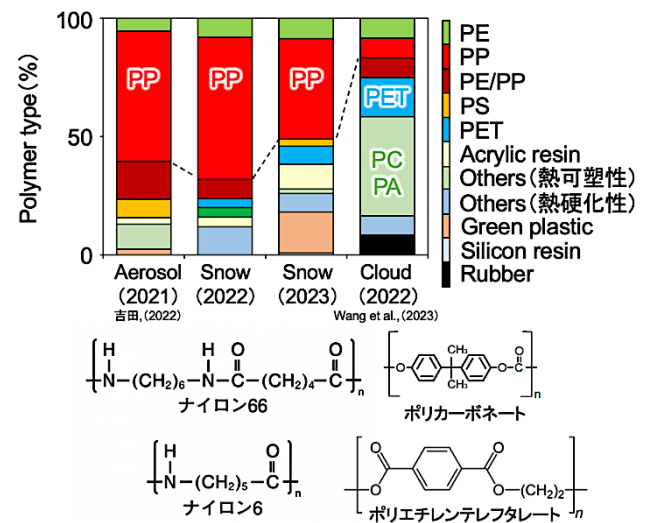


図2 富士山頂で検出された大気中マイクロプラスチック

おわりに

雲水では水に濡れやすいプラスチックが多く、AMPsが雲粒を作る核 (雲凝結核) になり、降雪では水を弾きやすいプラスチックが多いですが、劣化が進行していることから、AMPsが水蒸気昇華や付着した水を凍らせる核 (氷晶核) となり、雪を降らしている可能性が観測から示されました。

謝辞

この研究は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)、一般財団法人新技術振興渡辺記念会受託事業により行った。

大陸から運ばれた粒子の特徴は？～PM₁の磁性に着目～（SR10）

米持真一¹, 村田浩太郎¹, 大河内博², 反町篤行³, Ki-Ho Lee⁴

1.埼玉県環境科学国際センター, 2.早稲田大学, 3.東洋大学, 4.韓国済州大学校

1. はじめに

磁性粒子は人体に悪影響を及ぼす可能性が指摘されている¹⁾。磁性粒子には砂鉄のような自然起源のものもあるが、人為的な発生源や生成過程としては高温燃焼や金属の摩耗などが考えられる。しかし、これらはまだ十分に解明されておらず、磁性粒子（もしくは磁性粒子を多く含む磁性フラクション）の分離はほとんど事例がない。

我々はこれまで、フィルターに捕集した粒子試料から、磁性フラクションを分離する方法を検討し、石炭燃焼粒子²⁾や道路沿道³⁾、鉄道近隣で採取した粒子試料の特徴を検討してきた。特に石炭燃焼粒子は磁性フラクションの割合が高く、粒子重量の8割を超える試料もあった²⁾。

自由対流圏に位置する富士山頂は、長距離輸送された大気汚染物質の評価に適し、これまでにPM_{2.5}やPM₁に含まれる石炭燃焼に由来するAsなどに着目して解析を行ってきたが、今年度はPM₁中の磁性粒子に着目し、長距離輸送の指標となる可能性について検討を行った。

2. 方法

旧富士山測候所1号庁舎2階に設置したPM_{2.5}シーケンシャルサンプラー2025iの分級器をPM₁サイクロンに交換し、2023年7月23日～8月21日に試料採取を行った。フィルター交換は5日（120時間）毎に行い、①7/26-31、②7/31-8/5、③8/5-10、④8/10-15、⑤8/15-20の5試料を得た。フィルター試料はコンディショニング後に精密電子天秤を用いて質量濃度を求めた後、2片に分割し、1片は表面磁束密度1.2 Tesla（1 Tesla=10,000 gauss）のネオジウム磁石を用いて磁気分離を行った。磁性、非磁性フラクションの無機元素は、PTFE容器中に試料を移し、HNO₃、HF、H₂O₂を添加してマイクロウェーブで高温高压分解を行った後ICP-MS法により定量した。

3. 結果と考察

期間中のPM₁およびPM₁中の磁性フラクションの割合を図1に示す。PM₁平均濃度は1.9 μg/m³であり2022年度の1.6 μg/m³と同程度であった。①と②のPM₁濃度はそれぞれ5.3 μg/m³、2.7 μg/m³であり、磁性フラクションの割合は0.06、0.04であるのに対し、③～⑤は0.1～0.8 μg/m³と特に低く、磁性フラクションの割合は0.6～0.7と高い値となった。後者は微量で秤量誤差が大きく、解析には使用しないこととした。

図2に磁性フラクション、非磁性フラクション中無機元素の構成比を示す。元素の構成比は磁性フラクションではZn, Fe, Cr, Ti, Moが特徴的であるのに対し、非磁性フラクションはAl,

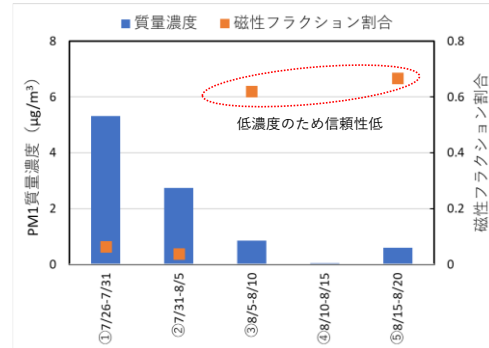
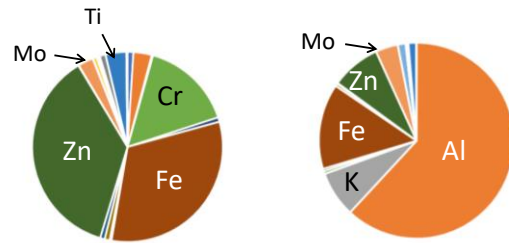


図1 PM₁の質量濃度と磁性フラクションの割合



(a) 磁性フラクション (b) 非磁性フラクション
図2 フラクション別無機元素の構成比

Fe, Zn, K, Moが特徴的であった。試料量が少ないため磁気分離にも難しさがあるが、自然由来でかつ磁性を持たないAl, Kが磁性フラクション側に分離されておらず分離は妥当と考えられた。また、富士山表層粒子の構成比から求めた元素の濃縮係数は、磁性フラクションでは人為起源元素が非磁性フラクションより10～100倍高値であった。

謝辞

本研究はJSPS科研費（課題番号21K12218, 代表: 米持）により実施された。

参考文献

- 1) Maher et al. (2016). Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113(39), pp. 10797-10801.
- 2) 米持真一 (2019). PM_{2.5}の特徴と石炭燃焼による生態影響, クリーンテクノロジー, 29, 10-15.
- 3) 米持真一 (2022). 道路沿道における大気磁性粒子の特徴, 第63回大気環境学会年会要旨集, p.162.

雲や雨の種になる粒子を調べるー富士山頂での氷晶核およびバイオエアロゾル観測2023 (SR03)

村田浩太郎¹, 鴨川仁², 大河内博³, 米持真一¹

1. 埼玉環境科学国際センター, 2. 静岡県立大学, 3. 早稲田大学

1. はじめに

水分が雲の水滴や氷粒を作るためには、足場(核)となる微粒子が必要不可欠である。水滴の核になる微粒子は雲凝結核、氷の核になる微粒子は氷晶核と呼ばれる。雲凝結核については、水分を吸収しやすい、吸湿性の粒子であることが分かっており、硫酸塩や硝酸塩、海塩の粒子などが代表的なものである。氷晶核については、一部の鉱物粒子や生物起源粒子(細菌のような微生物)が代表的なものであると言われる。雲凝結核の観測は、自動で計測できる装置もあり広く行われている。氷晶核についてはそのような装置がほとんどなく、手動計測が多いため、観測事例が限られている。とくに、上空での観測事例は非常に少なく、航空機や山岳など高い場所での観測結果が求められている。

今年度の研究では、これまでの富士山頂大気中の氷晶核の計測を継続しつつ、新しい取り組みとしてバイオエアロゾル観測を行った。バイオエアロゾルとは大気中の生物起源の浮遊粒子(エアロゾル)である。氷晶核として最も効率的にはたらく微粒子は細菌のような微生物であると言われている。微生物はDNAの配列を調べることで大まかな種類を推定することができる。今年度は氷晶核の計測と同時に、同じ試料の中にも含まれる細菌(バクテリア)のDNA配列も解析することで、効率的にはたらく氷晶核が見られるときに同時に存在する細菌群の特徴を明らかにするための観測を試みた。

2. 方法

2023年7月20日から8月3日の期間に、富士山測候所の2号庁舎外の西側にて、NPO山頂班の協力により毎日10:30~14:30の試料採取を実施した。ただし、7月24日は悪天候のため試料採取ができなかった。試料採取にはドライサイクロンエアサンプラー(Coriolis Compact, Bertin Technologies)を用いた。これはサイクロン式の掃除機のようなものであり、毎分50 Lで空気を吸引することで、0.5~10 μm の大気中微粒子をチリやホコリのようにカップの中に捕集できるように設計されている。採取した大気中微粒子試料は超純水に懸濁させ、半分は氷晶核の計測、残りは細菌のDNA配列の解析を行った。氷晶核の計測は、液滴凍結法(Drop Freezing Assay)と呼ばれる方法で実施した。DNA抽出及び次世代シーケンサーによる細菌16S rRNA遺伝子の配列決定は、株式会社ファスマックに委託した。得られた配列は細菌群集組成の解析パイプラインであるQIIME 2で処理し、統計解析にはRのveganパッケージを用いた。

3. 結果と考察

氷晶核は活性化温度が高いほど効率的に氷形成に寄与するが、一般的に大気中に極めて少数である。活性化温度の高い-10 $^{\circ}\text{C}$ ではたらく氷晶核が観測されたのは7月27日、28日、30日のみであった(図1)。また、ほとんどすべての活性化温度において最も高い氷晶核数濃度が観測されたのは7月30日であった。7月26日から7月28日までは気温と相対湿度が昼夜で互い違いに変動しており、雲がありつつも典型的な晴天であったと考えられる。一方で7月29日から7月31日までは相対湿度が夜間も上昇せず、雲の少ない比較的乾燥した晴天であったと考えられる。すなわち、活性化温度の高い氷晶核数濃度が観測された7月27日、28日と、30日とは異なる性質の気塊の影響を受けていたと考えられ、効率的にはたらく氷晶核の出現要因は共通とは限らない可能性が見出された。

細菌については、観測期間全体で500種類以上の属(genus)が見出された。ほぼ全ての試料から検出されたのは*Pseudomonas*属と*Kocuria*属のみであり、これらが山頂大気中に普遍的に存在する細菌であると考えられる。その他、細菌ではないがミトコンドリアの配列も試料中から多く見付き、真核生物由来の細胞も多量に存在していることが推察された。群集組成に対してクラスター分析を行なったところ、効率的にはたらく氷晶核数が見られた7月27日と28日は同一グループに分類された一方で、7月30日は別グループに分類され、前に述べた異なる気塊の影響を受けていたという考察と整合していた。発表では氷晶核数の計測結果と併せた詳細な解析結果を紹介する予定である。

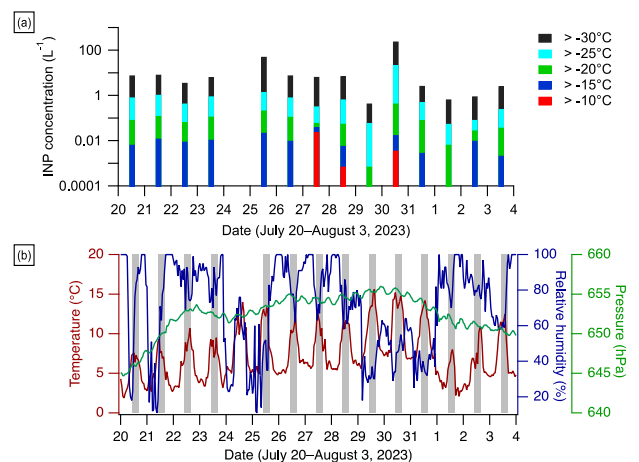


図1 (a) 活性化温度別の氷晶核数濃度の日変化と(b) 気象変動(灰色の影は上と対応した試料採取期間を示している)

富士山頂における二酸化炭素濃度の長期観測(SR01)

寺尾有希夫

国立環境研究所 地球システム領域

1. はじめに

東アジアの中緯度帯は世界で最も経済活動が盛んな地域であり、この地域から人為的に排出される温室効果ガスは増加傾向にある。そのため、国立環境研究所は富士山頂で大気中二酸化炭素(CO₂)濃度の高精度での長期観測および大気の定期採取によるCO₂以外の温室効果ガス(メタン(CH₄)や一酸化二窒素(N₂O)など)濃度の長期観測を実施している。東アジアの自由対流圏高度で高精度の温室効果ガス観測を実施することは、東アジア域はもとより世界の炭素循環の解明のために有効である。

我々は1年の大半で商用電力の供給がない富士山測候所において大気中CO₂濃度を通年観測するために、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、2009年から富士山頂での一日1回(22-24時)のCO₂濃度観測を実施している¹⁾。また、2017年からはフラスコサンプリング装置を設置して月1回の大気試料の自動採取を行い、CO₂以外のガス濃度観測も実施している。本報では、これまでに得られた観測結果を報告する。

2. 2023年夏期観測中の装置メンテナンス

2023年7月11日から7月12日の山頂作業で、CO₂計とフラスコの交換や越冬バッテリー充電などを行い、2022年9月から2023年7月までの越冬期間中においてCO₂濃度データ取得とフラスコサンプリングが正常に実施されたことを確認した。

2023年8月21日から8月22日の作業では、越冬準備に加え、2021年夏から不通であったイリジウム衛星通信による観測データ転送について集中的に調査を行った。その結果、通信ケーブルの不具合を発見し、屋外のアンテナと室内の観測・通信装置をつなぐ通信ケーブルを張り直したことでイリジウム通信が復活した。その後、2023年8月22日から毎日データの送受信に成功したが、2023年10月2日を最後に通信が途絶えた。

3. 結果

図1に、富士山頂に設置したCO₂濃度観測システムとフラスコサンプリングシステムで観測された2017年から2023年8月のCO₂濃度の時系列を示す。CO₂濃度観測システムから求めた2022年の富士山頂CO₂濃度の年平均値は419.6 ppmで、2021年の年平均値と比べて2.0 ppm増加したことがわかった。フラスコサンプリングは、2020年7月から2021年7月にCOVID-19感染拡大防止対策での測

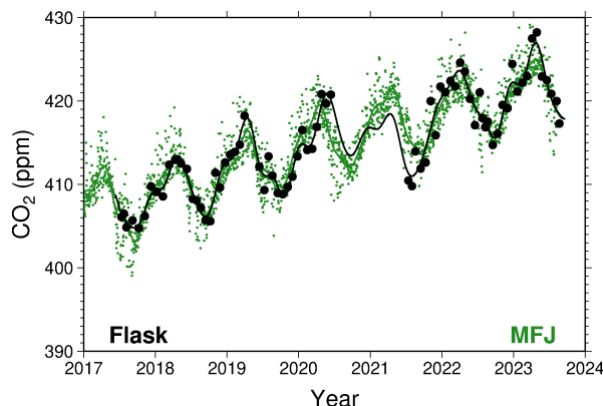


図1 2017年から2023年8月に富士山頂で観測されたCO₂濃度の時系列。緑ドットが現場に設置した分析計の結果、黒丸がフラスコサンプリングで得られた観測値(曲線はフッティングカーブ)を表す。

候所閉鎖によるサンプリングの中断があったが、それ以外の期間において現場観測から得られたCO₂濃度の季節変動とよく一致し、月1回のみの観測だが大気中のCO₂濃度変動をよく捉えていることが確認された。

図2(上)に、富士山頂に加えて、国立環境研究所地球環境研究センター(NIES/CGER)が実施している北海道・落石岬と沖縄県・波照間島で観測されたCO₂濃度の日平均値を示した。富士山頂、落石岬、波照間島で観測されたCO₂濃度データは、NIES/CGER地球環境データベースで公開されている²⁾³⁾⁴⁾。2022年の年平均CO₂濃度は、落石で421.0 ppm、波照間で421.1 ppmであった。富士山頂のCO₂濃度と平均濃度は近いが、季節変動は大きく異なった。

図2(下)に、各ステーションのCO₂濃度の長期トレンド成分(21ヶ月のカットオフ周期)⁵⁾から求めた年増加率と、エルニーニョ・南方振動(ENSO)指数の1つであるMultivariate ENSO Index Version 2⁶⁾を示した。富士山頂、落石岬、波照間島の3ヶ所で観測されたCO₂濃度の年増加率の変動と周期性はよく一致しており、それらは全球のENSO指数の周期性に同調していた。各ステーションのCO₂濃度増加率は、観測開始以降の強いエルニーニョ現象発生時(1997年春～1998年夏、2009年夏～2010年春、2014年春～2016年春)では3～4 ppm yr⁻¹の大きな増加を示したが、強いラニーニャ現象が生じた時期はCO₂濃度の増加率は2 ppm yr⁻¹を下回っていた。しかし、2021年秋～2022/23年冬の強いラニー

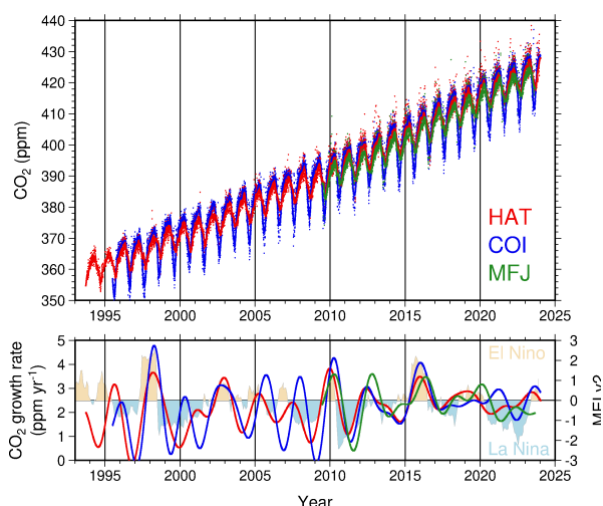


図2 富士山頂 (MFJ)、落石岬 (COI)、波照間島 (HAT) で観測された (上) CO₂濃度と (下) CO₂濃度の年増加率とエルニーニョ・南方振動指数 (MFI.v2)

ニャ現象時のCO₂濃度の増加率は2~3 ppm yr⁻¹を維持していた。結果として、2016年から2023年は、強いエルニーニョ現象が発生していないこともあり、富士山頂、落石岬、波照間島の3ヶ所ともCO₂濃度の増加率が2~3 ppm yr⁻¹の小さな範囲内で変動していた。

富士山頂のフラスコサンプリングからは、CH₄、CO、N₂O、SF₆濃度の分析を行った。富士山頂のCH₄の季節変動パターンは波照間と似ているが、冬の極大時の濃度は波照間より低い傾向があった。富士山頂のCO濃度は、夏の極小期は波照間、冬の極大期は落石岬に似た季節変動パターンが観測された。N₂OとSF₆濃度においても、明瞭ではない年があるものの、季節変動パターンが検出されており、貴重な自由対流圏のトレーサとしての利活用が期待される。

4. おわりに

近年は、パリ協定のグローバルストックテイクなどで温室効果ガス排出量の即時的な検証が求められているため、世界中の温室効果ガス濃度の大気観測データを統合してモデル解析を行うことで、全球・領域・国スケールの炭素収支解析を行う取り組みが加速している。富士山頂での温室効果ガス観測データは、貴重な東アジアの自由対流圏のデー

タとして炭素収支解析モデル⁷⁾等での利用が進んでいるため、観測の継続が求められている。また、富士山は日本の大都市圏と同じ緯度帯にあるため、富士山頂の観測データは大都市圏からの温室効果ガスの排出を検出⁸⁾する際のバックグラウンドサイトとなり得る。我々の富士山頂における温室効果ガス濃度の長期観測は、このような国際的、社会的背景とも深く繋がっているため、ご理解とご支援をお願いしたい。

参考文献

- 1) Nomura, S., Mukai, H., Terao, Y., Machida, T., and Nojiri, Y. (2017). Six years of atmospheric CO₂ observations at Mt. Fuji recorded with a battery-powered measurement system, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 667–680.
- 2) Nomura, S., Mukai, H., Terao, Y. (2017). Daily observational data of atmospheric CO₂ mixing ratios at the summit of Mt. Fuji, Ver.2.0, Earth System Division, NIES, DOI:10.17595/20170616.001.
- 3) Mukai, H. et al. (2014). Continuous observational data of atmospheric CO₂ mixing ratios on Hateruma Island, Ver.1.5, Center for Global Environmental Research, NIES, DOI:10.17595/20160901.001.
- 4) Mukai, H. et al. (2014). Continuous observational data of atmospheric CO₂ mixing ratios at Cape Ochi-ishi, Ver.1.5, Center for Global Environmental Research, NIES, DOI:10.17595/20160901.002.
- 5) Nakazawa, T., Ishizawa, M., Higuchi, K., Trivett, N.B.A. (1997). Two curve fitting methods applied to CO₂ flask data. *Environmetrics*, 8: 197-218.
- 6) Zhang, T. et al. (2019). Towards probabilistic multivariate ENSO monitoring. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 10532–10540.
- 7) Niwa, Y., et al. (2022). Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMOM-CO2 v2021.1. *Prog Earth Planet Sci* 9, 42.
- 8) 寺尾有希夫, 石戸谷重之 (2021) 大都市における温室効果ガスと関連物質の大気観測. *大気化学研究*, 45 https://jpsac.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/07/A_ACR_vol45.pdf

2023年夏期富士山頂のCO, O₃, SO₂観測結果 (SR02)

○小山有宇理¹, 加藤俊吾¹, 大河内博², 三浦和彦³, 和田龍一⁴, 皆巳幸也⁵, 鴨川仁⁶

1.東京都立大学, 2.早稲田大学, 3.東京理科大学, 4.帝京科学大学, 5.石川県立大学, 6.静岡県立大学

1. はじめに

自由対流圏における微量ガスのバックグラウンドレベルの変動や傾向を理解し, 人為起源や自然起源の影響を評価するためには, 山岳地点での観測が重要です. 中でも富士山は周囲に遮蔽物がなく, 局所的な影響が非常に小さいため, バックグラウンド濃度の観測に理想的な場所と考えられています. 本研究の目的は, 夏期の富士山頂におけるCO, O₃, SO₂の大気観測を行い, バックグラウンドレベルの大気汚染物質の濃度変動を明らかにすることです.

2. 実験

2007年から富士山頂に位置する富士山測候所で観測を例年行っていますが, 今年も2023年7月15日から8月24日まで, 標高3776メートルに位置する富士山測候所でO₃, CO, およびSO₂を観測しました. O₃, CO, およびSO₂はそれぞれ紫外線吸収, 赤外線吸収, および紫外線蛍光を用いて測定しました. また, NOAAが提供するHYSPLITMODEL (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>) を使用して, 大気がどこから流れてきたのかの推測を行いました.

3. 結果と考察

図1は2023年夏期のCOおよびO₃の1時間平均濃度を示しています. 全体的にCOとO₃の濃度は同じような変動が観測されました. オレンジの枠で示した高い濃度が見られた期間は東アジア地域からの越境大気汚染の影響が考えられます. また高濃度の期間には北からの大気が流れ込んでおり, 低濃度の期間は南からの海洋性の大気が流れてきていることがわかりました. これは高緯度になるほど濃度が高くなるというCOの緯度分布を大きく反映している結果だと考えられます. 一方水色で示した, O₃濃度だけ高い場合は水蒸気量が少なくなっていました. これは

成層圏からの大気の流入が大きく影響していることが考えられます.

図2は, 2023年夏期のSO₂の1時間平均濃度を示しています. 濃度は数回にわたり上昇が観測されました. この期間には富士山で火山活動がみられなかったため, これらの高濃度は近隣の山での火山活動に起因すると考えられます. 濃度上昇がみられた6つの時間で空気がどこから来たか計算してみたところ, 青丸で示したピークは近隣で火山活動が行われている大涌谷の影響が考えられました. また, 赤丸で示したピークは夏期期間に火山活動が活発になっていた浅間山からの火山ガスの影響が考えられました.

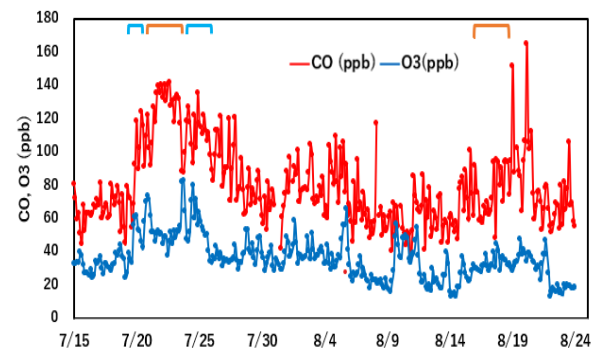


図1 2023夏期観測期間のCO, O₃の1時間平均濃度変動

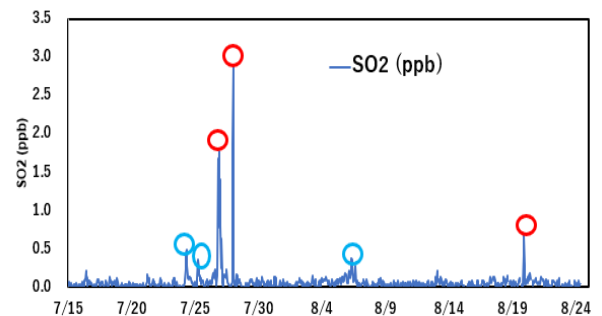


図2 2023夏期観測期間のSO₂の1時間平均濃度変動

「イマフジ。」プロジェクトによる富士山気象観測の試み -富士登山の安全のために- (SU01)

小柳津由依¹, 柴崎俊明¹

1. 青山シビルエンジニアリング株式会社

1. はじめに

2023年夏の時点で、富士山の一般登山者が入手できる気象観測情報は、気象庁による富士山頂のAMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) データ(以下、「富士山AMeDAS」)がある。しかし、富士山AMeDASで提供されているデータは、気温、相対湿度、大気圧の3要素のみであり、降水量や風向風速等の観測情報は提供されていない。一方、認定NPO法人富士山測候所を活用する会(以下、「NPO」)は、夏期に富士山頂で降水量と風向風速の気象観測を行っている。

富士山周辺のAMeDAS地点は、例えば気温であれば、富士山を取り囲むように北から河口湖、山中、御殿場、三島、富士、南部、切石、古関の8地点(図1参照)のデータが提供されているが、標高や登山道からの距離等を考慮すると、登山者にとって十分な気象観測情報が提供されているとは言い難い。

風向風速に関しては、富士山周辺では河口湖にウィンドプロファイラ観測局(以下、「河口湖WINDAS」)があり、上空の風向風速を高度約300m毎に、10分間隔で観測している。しかし、この情報と富士山頂及び各登山道での風向風速の状況とどの程度相関性があるかは不明である。

そこで、我々は「イマフジ。」プロジェクトと称して、山頂及び各登山道に8つの気象観測地点を設置し、気象観測を実施することにより、富士山の気象の標高差や地域差を把握するとともに、一般登山者向けにこれらの地点での気象現況の情報提供を開始した。そして、今回、これらの気象観測データをもとに、2023年の夏期開山期間中における気象の変化と富士登山者の動態との関連性について調査を行った。

本稿では、2023年夏期の富士山頂での気象観測結果を中心に、「イマフジ。」プロジェクトの気象観測結果(以下、「ACEデータ」)、NPOの富士山頂気象観測結果(以下、「NPOデータ」)、及び気象庁の富士山AMeDAS、御殿場AMeDAS及び河口湖WINDASの気象観測結果の比較と、気象変化と富士登山者の動態の関係を調査し、富士山頂及び各登山道における詳細な気象観測の有用性について議論する。

2. 使用データ

① ACE データ (図1 参照)

・観測地点(期間):

旧富士山測候所1号庁舎(2023/7/7 13:10~8/31 11:10)

富士宮口6合目(2023/7/11 9:50~9/9 24:00)

御殿場口7合4勺(2023/7/10 10:00~9/9 24:00)

御殿場口新5合目(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

御殿場口1合目(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

須走口5合目(2023/7/2 12:40~9/9 24:00)

須走口1合目(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

吉田口1合目(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

・観測項目:

気温、相対湿度、降水量、風向風速、大気圧、日射量、紫外線量(地点により異なる)

② NPO データ

・観測地点(期間):

旧富士山測候所3号庁舎(2023/8/1 14:00~9/2 12:20)

・観測項目:

降水量、風向風速

③ 富士山頂 AMeDAS

・観測地点(期間):

富士山頂(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

・観測項目:

気温、湿度、大気圧

④ 御殿場 AMeDAS

・観測地点(期間):

御殿場市(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

・観測項目:

気温、風向風速

⑤ 河口湖 WINDAS

・観測地点:

河口湖町(2023/7/1 0:00~9/9 24:00)

・観測項目:

風向風速

・使用高度:

1151m, 1442m, 1733m, 2024m, 2315m, 2607m, 2898m, 3189m, 3480m, 3771m, 4062m

(富士山頂データ比較時 3771mのみ)

⑥ 2023年の富士山登山者数

・環境省 2023年夏期の富士山登山者数について(詳細版)
1)

山岳地帯での気象測器の設置は、必ずしも理想的な状態が確保できるとは限らない。我々が設置をした気象測器も、NPOや山小屋、自治体などの協力を得て、工夫を凝らしながら安全な場所への設置を心がけているが、気象観測にとって必ずしも理想的になったとは言い切れない。そこで、今回設置をしたACEデータばかりではなく、NPOデータ、富士山

AMeDAS, 御殿場AMeDAS, 河口湖WINDASも比較のために検討に使わせて頂いた。

3. 比較検討結果

3-1. 富士山頂データ比較 (2023/8/1 14:00~8/31 11:10 のデータを使用)

(1) 気温

図2は富士山頂におけるAMeDASデータとACEデータの気温のグラフを表す。相関係数:(以下,「R」)=0.86と高い相関性がある。

(2) 相対湿度

図3は富士山頂におけるAMeDASデータとACEデータの相対湿度のグラフを表す。R=0.95と非常に高い相関性がある。

(3) 現地気圧

図4は富士山頂におけるAMeDASデータとACEデータの現地気圧のグラフを表す。R=0.99と非常に高い相関性がある。

(4) 降水量

図5は富士山頂におけるNPOデータとACEデータの10分間降水量のグラフを表す。R=0.75であり、ACEデータの方がNPOデータよりも1.2倍ほど大きく観測されている。

(5) 風速

図6は富士山頂におけるNPOデータとACEデータの10分間平均風速のグラフを表す。R=0.77であり、ACEデータの方がNPOデータよりも2.3倍ほど大きく観測されている。

図7は河口湖WINDASの高度3771mにおける風速と、富士山頂のACEデータの10分間平均風速のグラフを表す。R=0.37であり、ACEデータの方が河口湖WINDASよりも0.5倍ほど小さく観測されている。

図8は河口湖WINDASの高度3771mにおける風速と、NPOデータの10分間平均風速のグラフを表す。R=0.45であり、NPOデータの方が河口湖WINDASよりも0.2倍ほど小さく観測されている。

(6) 風向

図9は富士山頂におけるACEデータ及びNPOデータと河口湖WINDASの高度3771mにおける平均風向ヒストグラムを表す。3地点のうち少なくとも1地点に欠損データのある観測時間のデータは3地点ともに除外をし、全て同じ観測期間のデータで比較をした。ACEデータは南東方向のデータが約34%と最も多く観測され、NPOデータは東南東が約24%と最も多く観測され、河口湖WINDASは南南東が約24%と最も多く観測された。

(考察)

富士山頂における、気温、相対湿度、現地気圧に関して、ACEデータと富士山AMeDASとを比較すると、相関係数(R)が高く、観測値に大きな差はなかった。降水量、風速に関して

は、ACEデータの方がNPOデータよりも大きく観測されていた。また、河口湖WINDASはACEデータ及びNPOデータよりも大きく観測され、ACEデータの方が河口湖WINDASに近かった。風向に関しては、ACEデータが南東より、NPOデータが東より、河口湖WINDASが南よりとなり、3地点の風向が第四象限の範囲にはほぼ収まり、傾向が似ていた。

図10は富士山頂において、ACEデータを観測した旧富士山測候所1号庁舎と、NPOデータを観測した旧富士山測候所3号庁舎と、河口湖WINDASの地点を表す。また、図11にはACEデータ及びNPOデータと河口湖WINDASの高度3771mにおける平均風向風速の時間変化を示す。旧富士山測候所において、ACEの設置場所は北東よりに1号庁舎が遮蔽となり、NPOの設置場所は西よりに3号庁舎が遮蔽となる。ACEもNPOも、旧富士山測候所という平地とは全く異なる設置環境である中で、気象測器を高めに設置し遮蔽物の影響を減らす対策をしたが、その設置地点の気象観測データとしては取得できているものの、降水量と風向風速の観測において、設置環境が与える影響が特に大きかったと考えられる。また、風向と風速が、1日の時間帯や天気により変化している事も考えられるため、今後、更に考察を深める。

3-2. 全地点データ比較

(1) 気温

表1は富士山AMeDAS, ACE全8地点及び御殿場AMeDAS各地点間の気温差を表す。標高が高い地点程気温が低く、富士山AMeDASとの差が小さい。表2は富士山AMeDAS, ACE全8地点及び御殿場AMeDAS各地点間の気温の相関係数を表す。富士山AMeDASとACE富士山頂の相関係数が0.9と非常に高い。また、ACE御殿場口7合4勺やACE須走口5合目は、富士山AMeDASとACE富士山頂との相関係数が周辺よりも低い。

標高差が小さいほど、一般に相関が良くなるが、地点によっては必ずしもそうとはとは言えない。

(2) 風速

表3はNPO富士山頂, ACE全8地点及び御殿場AMeDAS各地点の平均風速の差を表す。ACE富士山頂がNPO富士山頂より風速が大きく観測される傾向がある。しかし、御殿場AMeDASの方が、より標高の高いACE須走口5合目, ACE御殿場口新5合目, ACE吉田口1合目及びACE須走口1合目よりも風速が大きい傾向があり、必ずしも標高の高い地点ほど風速が大きいわけではなく、地域差があるようである。表4はNPO富士山頂, ACE全8地点及び御殿場AMeDAS各地点間の風速の相関係数を表す。NPO富士山頂と相関が良いのは、同じ富士山頂で観測をしているACE富士山頂である。しかし、ACE富士山頂との標高差が比較的小さいACE御殿場口7合4勺であっても相関係数は低いなど、全体的に地点間の相関は低く、地域によって風速はばらつく傾向がある。

(3) 風速×河口湖 WINDAS

表5は河口湖WINDASの各高度における風速と、NPO富士山頂、ACE 全8地点及び御殿場AMeDASの平均風速との差を表す。全体的に河口湖WINDASのほうが大きめの風速を記録するが、河口湖WINDASとの差が最も小さかったのはACE富士山頂であった。表6は河口湖WINDASの各高度における風速と、NPO富士山頂、ACE 全8地点及び御殿場AMeDASの平均風速との相関係数を表す。一般に観測点の標高が高くなるにつれ、河口湖WINDASの高い観測高度のデータと相関が良くなる傾向があるが、各地点と最も相関が高くなるのは、必ずしも設置地点の標高と一致しない。

(考察)

富士山頂及び各登山道において、一般的な気象の知識の一つである「標高が高い程気温が低くなる」傾向になる事が分かったが、気温の相関係数を算出すると、必ずしも標高が近いほど相関が良くなるとは限らない。また、風速に関しても、一般に標高が高いほど風速は大きくなる傾向はあるが、気温以上に同様の標高でも相関は悪く、地域差が大きいことがわかった。これは、富士山の斜面の向きや日射の当たり方など、各地点の特徴が強く、複数の原因が複雑に関係し合っていることが考えられる。特に風向風速は山頂や麓に限られた観測地点のデータだけから各登山道の状況を精度よく推測するのは限界があり、各登山道を中心として観測点を増やす意義があると考えられる。

4. 観測された気象状況と登山者の動態

環境省の「2023年夏期の富士山登山者数について(詳細版)」1)をもとに、各登山道の登山者と近傍の気象データの関係を比較してみた。全登山道において土日祝日の登山者数が多く、平日の登山者数が少ない傾向にあり、曜日による変動が大きい。登山道ごと、曜日ごとの平均人数を算出したうえで、各曜日の実際の登山者数を平均登山者数で割ることで曜日による一般的な傾向を取り除いた(以下、「曜日平滑化値」)。

一例として、図12に富士宮ルートでの登山者の曜日平滑化値を表す。数値が大きい程、曜日に関係なく登山者が多い傾向にある事を示す。この数値の変動は主に曜日変動以外のイベントや祝日、そして気象などの影響を受けていると考えられる。登山に特に影響のある気象要素として、雨と風が考えられるため、図12には開山期間中のACE富士山頂データとACE富士宮六合目の10分間降水量および10分間平均風速を重ねてみた。この図から降水量と平均風速の値が大きい日には曜日平滑化値が小さい傾向がある事が分かる。多くの登山者は気象状況や天気予報を見て入山をある程度判断していると考えられる。一方、比較的雨や風が強い日でも登山者の減少があまり見られない日もあることから、より詳細な気象情報をわかりやすく提供し、注意を喚起することにより、登山者の動

態は気象に対してより敏感となり、気象情報が行動判断に活かされることにより、安全登山に寄与すると考えられる。

5. 結論及び今後の課題

富士山麓の気象状況は地域・標高差などに差があり、局地的な気象現象も発生する。登山者が的確に入山の可否を判断し、適切な装備を準備するためには、気象測器の適正な密度での配置、気象観測情報の提供が重要と考えられる。

今後の課題として、大気圧や日射量等の他の気象要素の地域差とその原因についても検討していきたい。また、気象庁の提供する高解像度降水ナウキャストとACEの降水量の比較検討を行い、実測値とナウキャストデータとの相関性を検証したい。更に、事故や体調不良等による救助要請者の多い日と気象状況とを対比検討することで、登山者がより簡単にアクセスできる気象情報の重要性を検証できる可能性があるため、こちらも検討していきたい。

最後に、2024年夏は、更に数地点の新規設置を行う計画がある。安全登山のため、登山者に寄り添って「イマフジ。」プロジェクトを遂行していきたい。近い将来、富士山での多数の観測地点のデータを用いて、富士山の天気予報の提供を行い、登山者をはじめとする多くの皆様に役立てて頂きたい。

参考文献

- 1) 環境省 関東地方環境事務所(2023/9/19)
2023年夏期の富士山登山者数について(詳細版)
https://www.env.go.jp/park/fujihakone/data/files/fujihakone_shosai_R5.pdf

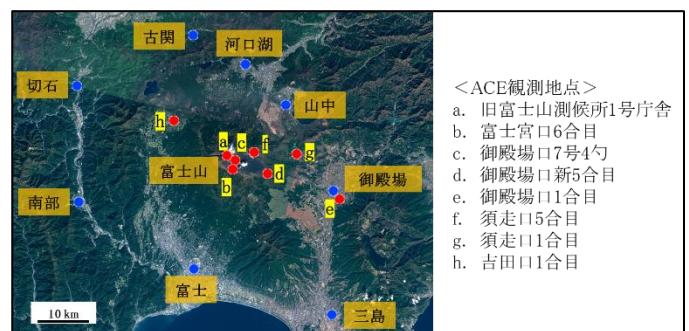


図1. 富士山周辺のAMeDAS地点とACE観測地点

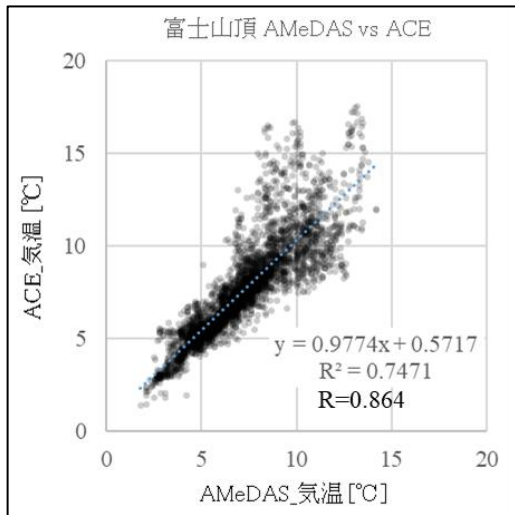


図2. 富士山頂 AMeDASとACEの気温

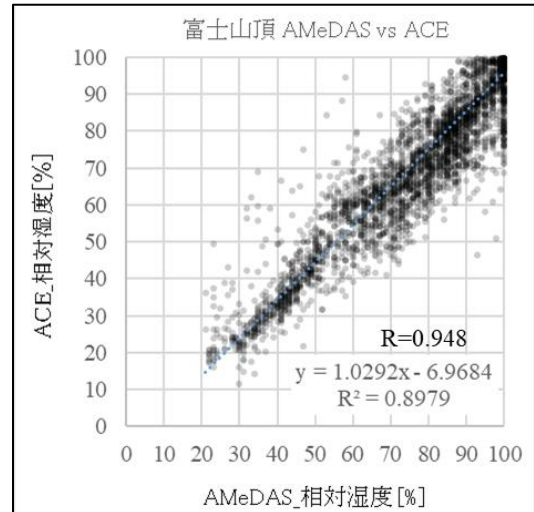


図3. 富士山頂 AMeDASとACEの相対湿度

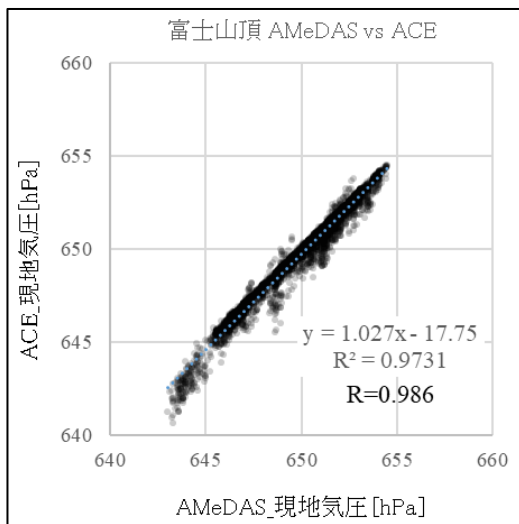


図4. 富士山頂 AMeDASとACEの現地気圧

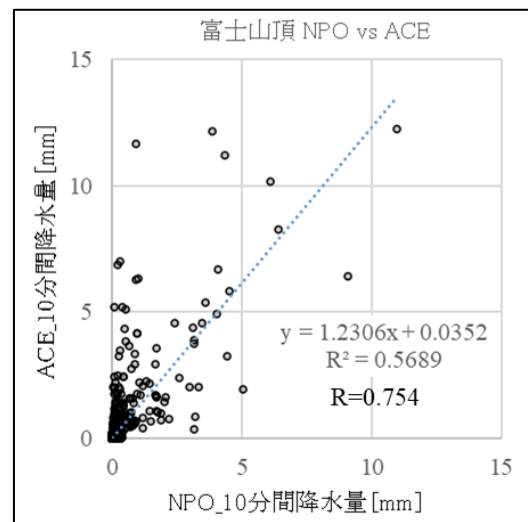


図5. 富士山頂 NPOとACEの10分間降水量

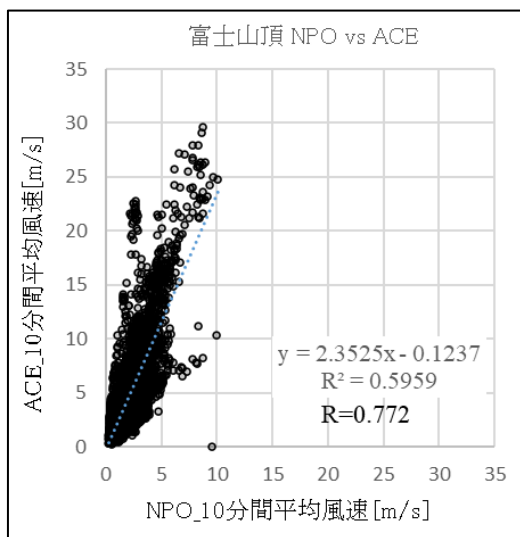


図6. 富士山頂 NPOとACEの10分間平均風速

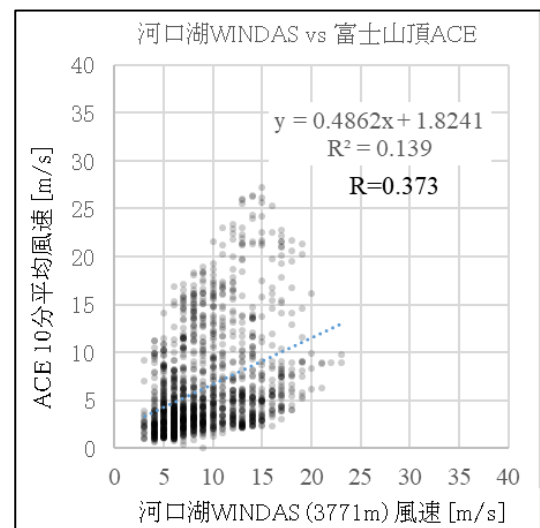


図7. 河口湖 WINDAS と富士山頂 ACE の風速
 ※同じ観測期間のデータで比較

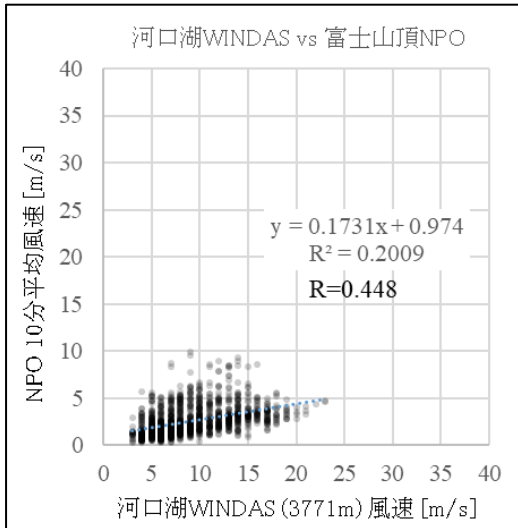


図8. 河口湖WINDASと富士山頂NPOの風速
 ※同じ観測期間のデータで比較

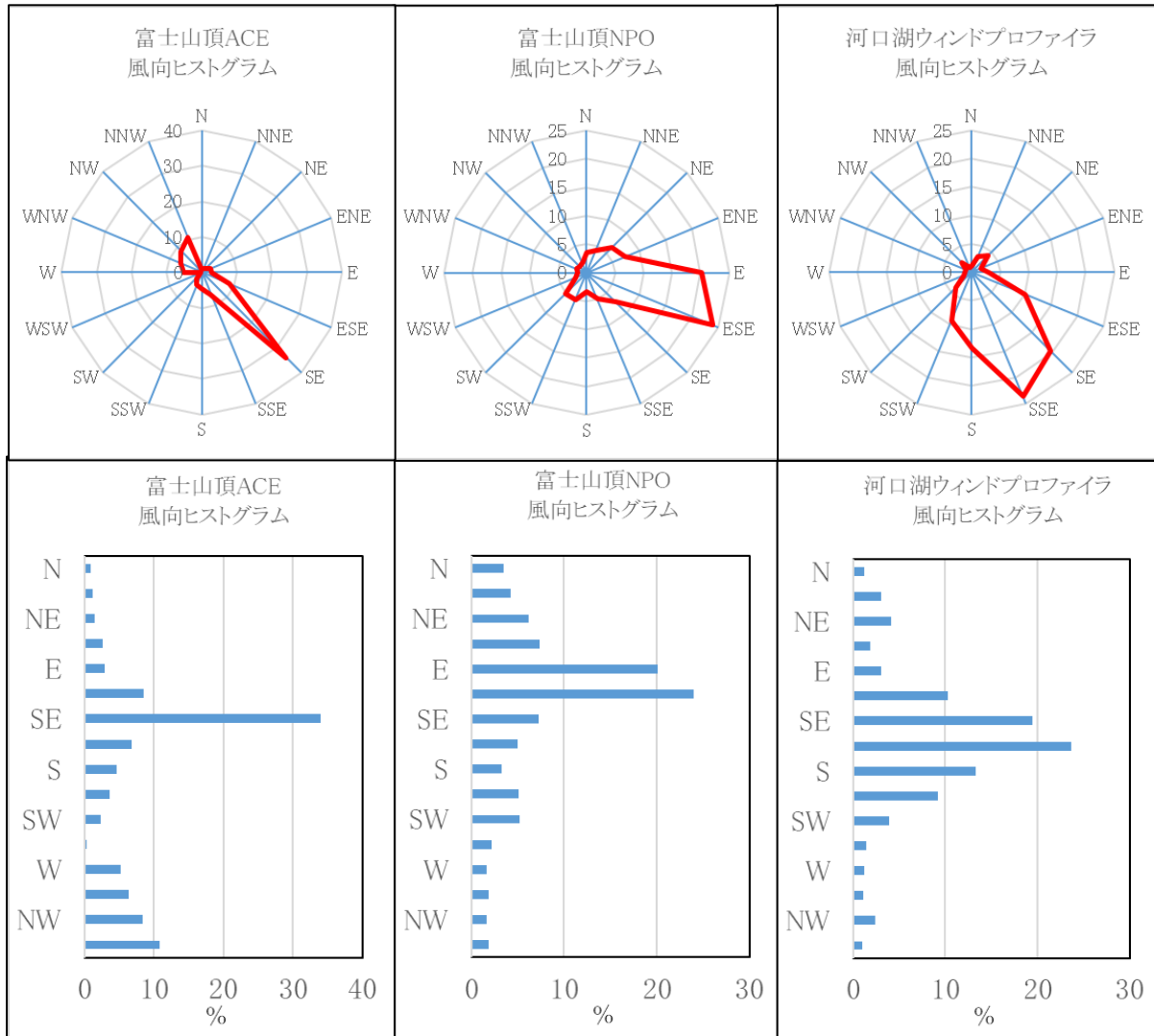


図9. 富士山頂ACEとNPO, 河口湖WINDAS (3771m) の風向ヒストグラム



図10. 旧富士山測候所ACE及びNPOの設置地点と、河口湖WINDASの位置

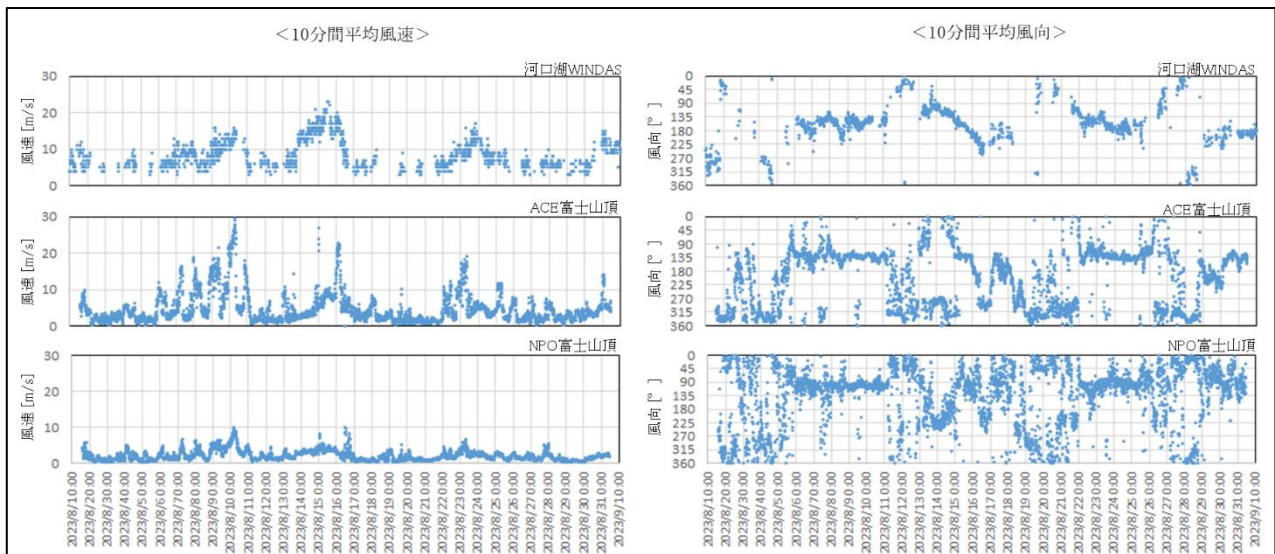


図11. 富士山頂ACEとNPO、河口湖WINDAS（3771m）の風向風速変化の比較

表1. 夏期期間中の平均気温の差（ペア同士データのある同じ観測期間の平均で比較）

気温差	地点	富士山 AMeDAS	ACE 富士山頂	ACE 御殿場口 7合4勺	ACE 富士宮口 6合目	ACE 須走口 5合目	ACE 御殿場口 新5合目	ACE 吉田口 1合目	ACE 須走口 1合目	御殿場 AMeDAS	ACE 御殿場口 1合目
地点	標高(m)	3776	3776	3094	2496	1957	1288	1231	828	470	446
富士山 AMeDAS	3776	0.00	0.31	5.14	8.42	10.32	13.32	13.67	14.00	18.08	18.53
ACE 富士山頂	3776	-0.31	0.00	4.82	8.11	10.06	13.05	13.45	13.78	17.92	18.39
ACE 御殿場口7合4勺	3094	-5.14	-4.82	0.00	3.37	5.10	8.18	8.57	8.94	13.13	13.62
ACE 富士宮口6合目	2496	-8.42	-8.11	-3.37	0.00	1.67	4.82	5.20	5.60	9.79	10.27
ACE 須走口5合目	1957	-10.32	-10.06	-5.10	-1.67	0.00	2.99	3.34	3.68	7.78	8.23
ACE 御殿場口新5合目	1288	-13.32	-13.05	-8.18	-4.82	-2.99	0.00	0.36	0.68	4.77	5.21
ACE 吉田口1合目	1231	-13.67	-13.45	-8.57	-5.20	-3.34	-0.36	0.00	0.33	4.41	4.85
ACE 須走口1合目	828	-14.00	-13.78	-8.94	-5.60	-3.68	-0.68	-0.33	0.00	4.08	4.53
御殿場 AMeDAS	470	-18.08	-17.92	-13.13	-9.79	-7.78	-4.77	-4.41	-4.08	0.00	0.44
ACE 御殿場口1合目	446	-18.53	-18.39	-13.62	-10.27	-8.23	-5.21	-4.85	-4.53	-0.44	0.00

※（気温差）＝（横軸の地点の平均気温）－（縦軸の地点の平均気温）

表2. 各観測地点の気温の相関

気温相関係数	地点	富士山 AMeDAS	ACE 富士山頂	ACE 御殿場口 7合4勺	ACE 富士宮口 6合目	ACE 須走口 5合目	ACE 御殿場口 新5合目	ACE 吉田口 1合目	ACE 須走口 1合目	御殿場 AMeDAS	ACE 御殿場口 1合目
地点	標高(m)	3776	3776	3094	2496	1957	1288	1231	828	470	446
富士山 AMeDAS	3776	1.00	0.90	0.66	0.78	0.59	0.71	0.70	0.71	0.72	0.71
ACE 富士山頂	3776	-	1.00	0.57	0.73	0.56	0.70	0.70	0.71	0.75	0.75
ACE 御殿場口7合4勺	3094	-	-	1.00	0.75	0.74	0.71	0.69	0.73	0.62	0.63
ACE 富士宮口6合目	2496	-	-	-	1.00	0.75	0.80	0.78	0.78	0.75	0.75
ACE 須走口5合目	1957	-	-	-	-	1.00	0.85	0.79	0.77	0.68	0.67
ACE 御殿場口新5合目	1288	-	-	-	-	-	1.00	0.91	0.89	0.85	0.83
ACE 吉田口1合目	1231	-	-	-	-	-	-	1.00	0.88	0.87	0.85
ACE 須走口1合目	828	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.88	0.87
御殿場 AMeDAS	470	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.98
ACE 御殿場口1合目	446	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

表3. 夏期期間中の10分間平均風速の差の平均

風速差	地点	NPO 富士山頂	ACE 富士山頂	ACE 御殿場口 7合4勺	ACE 富士宮口 6合目	ACE 須走口 5合目	ACE 御殿場口 新5合目	ACE 吉田口 1合目	ACE 須走口 1合目	御殿場 AMeDAS	ACE 御殿場口 1合目
地点	標高(m)	3776	3776	3094	2496	1957	1288	1231	828	470	446
NPO 富士山頂	3776	0.00	2.67	1.12	0.35	-0.79	-1.05	-1.51	-1.35	0.51	-0.04
ACE 富士山頂	3776	-2.67	0.00	-2.50	-2.90	-4.93	-5.24	-5.66	-5.54	-3.40	-4.06
ACE 御殿場口7合4勺	3094	-1.12	2.50	0.00	-0.63	-2.18	-2.39	-2.79	-2.66	-0.62	-1.24
ACE 富士宮口6合目	2496	-0.35	2.90	0.63	0.00	-1.55	-1.73	-2.15	-2.02	0.01	-0.60
ACE 須走口5合目	1957	0.79	4.93	2.18	1.55	0.00	-0.28	-0.70	-0.60	1.50	0.87
ACE 御殿場口新5合目	1288	1.05	5.24	2.39	1.73	0.28	0.00	-0.43	-0.33	1.79	1.16
ACE 吉田口1合目	1231	1.51	5.66	2.79	2.15	0.70	0.43	0.00	0.11	2.22	1.59
ACE 須走口1合目	828	1.35	5.54	2.66	2.02	0.60	0.33	-0.11	0.00	2.11	1.48
御殿場 AMeDAS	470	-0.51	3.40	0.62	-0.01	-1.50	-1.79	-2.22	-2.11	0.00	-0.63
ACE 御殿場口1合目	446	0.04	4.06	1.24	0.60	-0.87	-1.16	-1.59	-1.48	0.63	0.00

※ (風速差) = (横軸の地点の平均風速) - (縦軸の地点の平均風速)

表4. 各観測地点の10分間平均風速の相関

風速相関係数	地点	NPO 富士山頂	ACE 富士山頂	ACE 御殿場口 7合4勺	ACE 富士宮口 6合目	ACE 須走口 5合目	ACE 御殿場口 新5合目	ACE 吉田口 1合目	ACE 須走口 1合目	御殿場 AMeDAS	ACE 御殿場口 1合目
地点	標高(m)	3776	3776	3094	2496	1957	1288	1231	828	470	446
NPO 富士山頂	3776	1.00	0.76	0.13	0.31	0.39	0.16	-0.05	-0.11	-0.27	-0.16
ACE 富士山頂	3776	-	1.00	0.51	0.64	0.50	0.31	0.16	-0.04	0.20	0.24
ACE 御殿場口7合4勺	3094	-	-	1.00	0.71	0.47	0.38	0.28	0.04	0.14	0.14
ACE 富士宮口6合目	2496	-	-	-	1.00	0.28	0.34	0.24	0.01	0.21	0.24
ACE 須走口5合目	1957	-	-	-	-	1.00	0.52	0.33	0.02	0.07	0.11
ACE 御殿場口新5合目	1288	-	-	-	-	-	1.00	0.57	0.26	0.32	0.34
ACE 吉田口1合目	1231	-	-	-	-	-	-	1.00	0.31	0.38	0.37
ACE 須走口1合目	828	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.43	0.38
御殿場 AMeDAS	470	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.87
ACE 御殿場口1合目	446	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

表5. 河口湖WINDASの各高度における風速と各観測地点の平均風速との差の平均

風速差	地点	NPO 富士山頂	ACE 富士山頂	ACE 御殿場口 7合4勺	ACE 富士宮口 6合目	ACE 須走口 5合目	ACE 御殿場口 新5合目	ACE 吉田口 1合目	ACE 須走口 1合目	御殿場 AMeDAS	ACE 御殿場口 1合目
	高度(m)	3776	3776	3094	2496	1957	1288	1231	828	470	446
河口湖WINDAS	1151	3.71	-2.65	2.19	2.15	5.15	5.65	6.44	6.40	4.21	6.40
	1442	4.43	-0.90	2.75	3.27	5.64	5.99	6.52	6.43	3.94	6.43
	1733	4.50	-0.68	3.03	3.51	5.78	6.15	6.66	6.56	4.15	6.56
	2024	4.80	-0.29	3.42	3.94	6.05	6.44	6.95	6.85	4.55	6.85
	2315	5.10	0.37	3.88	4.39	6.39	6.78	7.29	7.20	5.04	7.20
	2607	5.39	0.86	4.28	4.86	6.96	7.34	7.83	7.71	5.56	7.71
	2898	5.80	1.37	5.10	5.59	7.97	8.45	8.98	8.87	6.69	8.87
	3189	6.00	1.94	5.53	5.94	8.36	8.86	9.39	9.29	7.11	9.29
	3480	6.44	2.16	6.23	6.48	9.02	9.59	10.13	10.05	7.94	10.05
	3771	6.66	2.49	6.58	6.84	9.67	10.22	10.79	10.72	8.52	10.72
	4062	6.73	2.30	6.86	7.08	10.11	10.78	11.39	11.37	9.19	11.37

※ (風速差) = (河口湖 WINDAS 風速) - (縦軸の地点の平均風速)

表6. 河口湖WINDASの各高度における風速と各観測地点の平均風速の相関係数

風速相関係数	地点	NPO 富士山頂	ACE 富士山頂	ACE 御殿場口 7合4勺	ACE 富士宮口 6合目	ACE 須走口 5合目	ACE 御殿場口 新5合目	ACE 吉田口 1合目	ACE 須走口 1合目	御殿場 AMeDAS	ACE 御殿場口 1合目
	高度(m)	3776	3776	3094	2496	1957	1288	1231	828	470	446
河口湖WINDAS	1151	0.15	0.11	0.36	0.13	0.49	0.34	0.29	0.19	0.34	0.33
	1442	0.47	0.43	0.39	0.41	0.53	0.51	0.40	0.09	0.30	0.34
	1733	0.48	0.47	0.47	0.54	0.55	0.55	0.41	0.05	0.27	0.33
	2024	0.49	0.51	0.52	0.63	0.54	0.51	0.39	0.06	0.24	0.29
	2315	0.52	0.52	0.55	0.65	0.57	0.47	0.33	0.03	0.15	0.21
	2607	0.57	0.64	0.61	0.71	0.56	0.42	0.26	-0.01	0.17	0.22
	2898	0.55	0.71	0.64	0.72	0.56	0.42	0.26	0.02	0.24	0.28
	3189	0.57	0.75	0.62	0.70	0.54	0.41	0.28	0.03	0.28	0.30
	3480	0.48	0.72	0.59	0.63	0.53	0.39	0.27	0.05	0.30	0.33
	3771	0.43	0.73	0.56	0.57	0.50	0.38	0.30	0.10	0.32	0.33
	4062	0.29	0.67	0.52	0.52	0.48	0.36	0.30	0.12	0.34	0.33

※太線で囲んだデータは各地点で最も高い相関を示しているもの

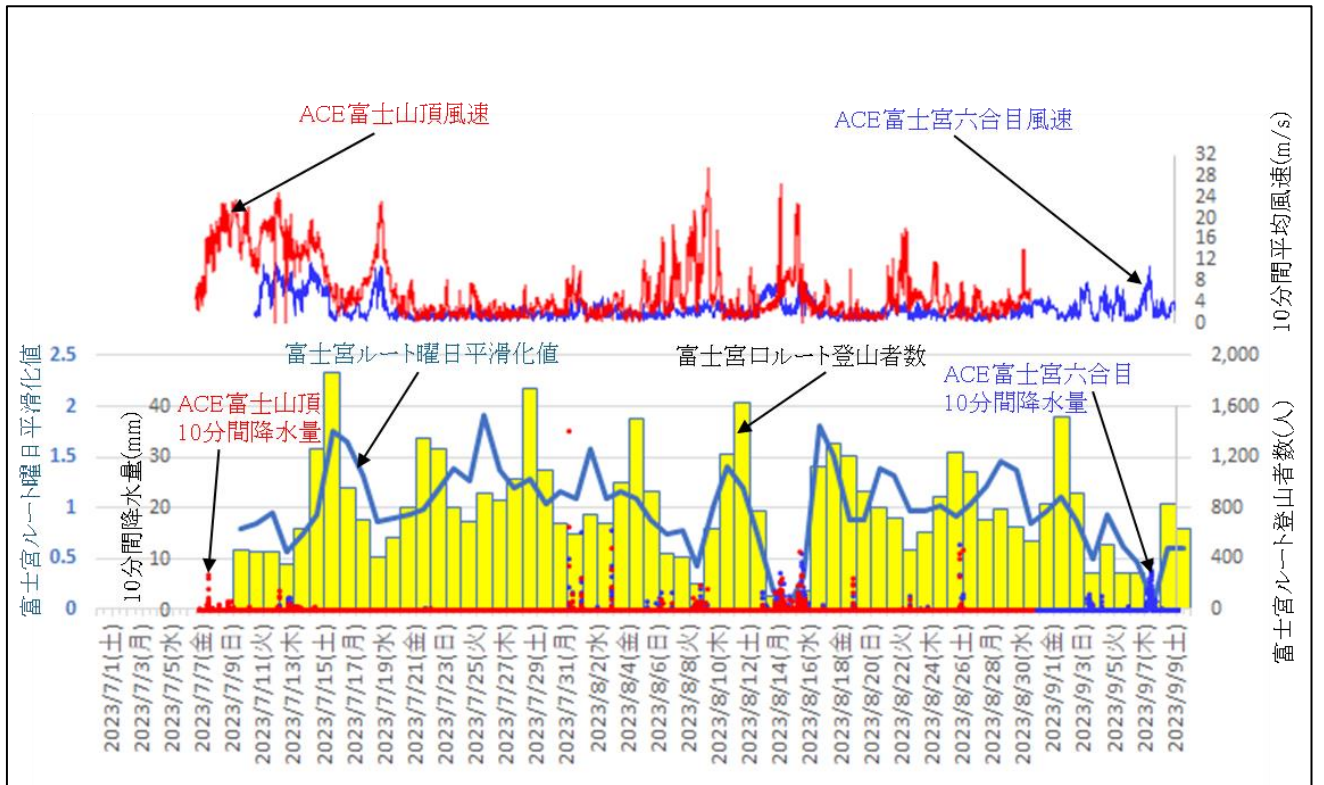


図12. 富士宮ルートにおける、登山者の曜日平滑化値による登山者の動態と気象との関係

気温を下げるエアロゾルは減っているか (TR01)

○三浦和彦^{1,2}, 永野勝裕¹, 大河内 博³, 速水 洋³, 加藤俊吾⁴, 和田龍一⁵, 皆巳幸也⁶, 小林 拓⁷, 森 樹大⁸, 矢吹正教⁹, 岩本洋子¹⁰, 上田紗也子¹¹, 青木一真¹², 鴨川 仁¹³

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.山梨大学, 8.慶應義塾大学, 9.京都大学, 10.広島大学, 11.名古屋大学, 12.富山大学, 13.静岡県立大学

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があります.

エアロゾル粒子が爆発的に増加する二酸化硫黄や揮発性有機化合物(VOC)などの気体が粒子になる現象を新粒子生成(NPF)といいます. 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航海をしていました. しかし2003年の航海までNPFはほとんど観測されませんでした. そして, 観測された例も自由対流圏で生成された粒子が高気

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(3776 m)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. エアロゾルが減っている!

ところが富士山頂で測定した2006年から2019年までの夏期のエアロゾル粒子の濃度は13年間に約3分の1に減っていました¹⁾. 走査型易動度分析装置(SMPS, DMA3081+CPC 3775)を用い粒径約15~470nmの粒径分布を測定しました. 図1にあるようにモード別に粒子濃度を見ると, 特に核生成モードの減少が著しく, 日中, 夜間ともに見られました. 東京スカイツリー(458m)で測定した粒子濃度も2016年6月から2018年9月までに約3分の1に減っています²⁾. 冷却効果のあるエアロゾルが減少した場合, それ分, 温室効果ガスの排出規制をしなくてはなりません. エアロゾルは今後も減少するのでしょうか?

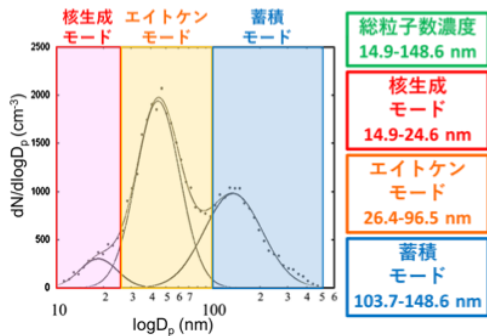


図1 モデル粒径分布の各モードの説明図

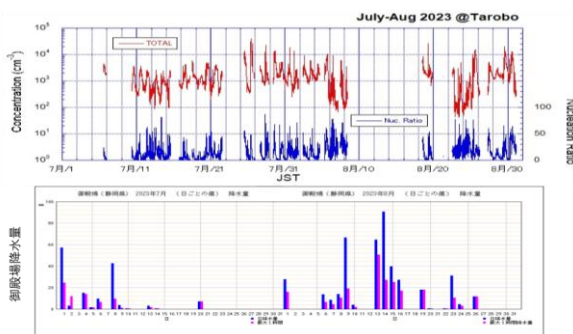


図2 2023年夏期集中観測期間に太郎坊で測定した総粒子濃度, 核生成モードの割合(上)と御殿場における降水量(下)

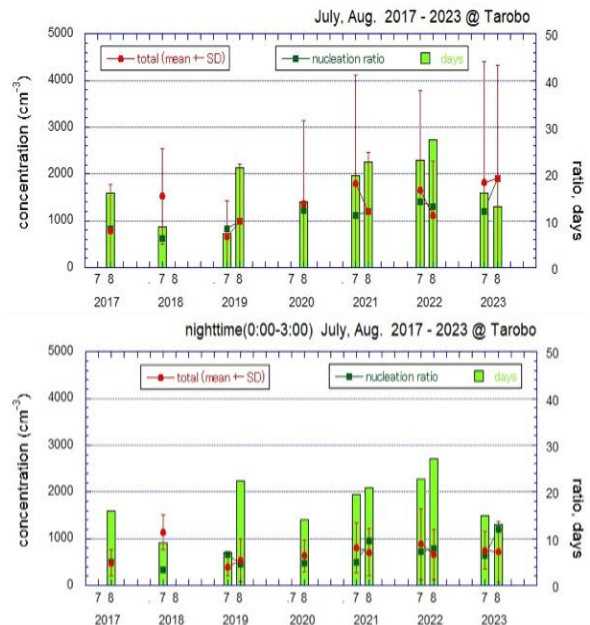


図3 2017年から2023年夏期集中観測期間に測定した総粒子濃度, 核生成モードの割合と月毎の測定日数上: 終日データ, 下: 夜間みのデータ

3. 太郎坊での観測

太郎坊(1290m)でのエアロゾル観測は2005年から夏期を中心に散発的に行っていましたが、新型コロナ感染を避けるため山頂での観測を断念し、2020年8月から太郎坊での観測を再開しました。2023年夏期集中観測期間の結果を図2に示します。総粒子濃度は2021年³⁾、2022年⁴⁾と同様、日中高く夜間に低いという日変化を示しました。また降水量が増加すると、濃度が減少していました。総粒子濃度が減少した時に、核生成モードの割合が大きくなる傾向が見られます。

図3に2017年から2023年に夏期集中観測期間に測定した総粒子濃度、核生成モードの割合と月毎の測定日数を示します。上図は終日、下図は人間活動の少ない夜間(0時~3時)のデータです。山頂の経年変化のように減少傾向は見られず、終日のデータはむしろ増加傾向が見られます。

図4に2017年8月~2023年12月まで太郎坊において同じ装置で測定した総粒子数濃度、核生成モードの割合、測定日数の経年変化(上)とモード別粒子数濃度の経年変化(下)を示します。左図は終日、右図は夜間のデータです。2017年から2023年の季節変化を見ると、冬期の、特に夜間(0時)の冬期の核生成モードの割合が高い傾向が見られます。太郎坊は森林地帯に位置するので、生物起源VOC(BVOC)によるNPFも予想されます。2020年夏は日中、NPFイベントがよく観測され、BVOCと核生成モードの粒子濃度には正の相関が見られました。しかし、2014-2015年の解析結果では、広葉樹が落葉する冬期の方がNPFイベントが多く⁵⁾、2021年~2023年も同様な結果となりました。

4. おわりに

太郎坊における総粒子数濃度には減少の傾向は見られませんでした。広葉樹が落葉する冬期にNPFイベントが増加する傾向が見られたことから、今後、この原因も含め解析したいと思います。また、太郎坊において自由対流圏のエアマスが測定できるかどうか、夜間のデータや風系を考慮して検討したいと思います。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究B(19H04238, 22H03732)(代表 矢吹正教, 2019-2021年度, 2022-2024年度)の助成により行われました。

参考文献

- 1) 五十嵐博己ら(2022)夏期の富士山頂における粒子数濃度の経年変化, *エアロゾル研究* **37(1)**, 36-44.
- 2) 三浦和彦(2021)東京都心における大気エアロゾル粒子の変動, *大気化学研究* **45**, A03
- 3) 三浦和彦ら(2022)微粒子が気候を変える!—富士山頂を利用したエアロゾルの気候影響の研究—, 第15回成果報告会要旨講演予稿集, 14-15.
- 4) 三浦和彦ら(2023)気温を下げるエアロゾルは減っているか, 第16回成果報告会要旨講演予稿集, 10-11.
- 5) 堀井憲一(2015)富士山太郎坊における新粒子の生成と成長について, 東京理科大学理学部第一部物理学科2014年度卒業論文, pp35.

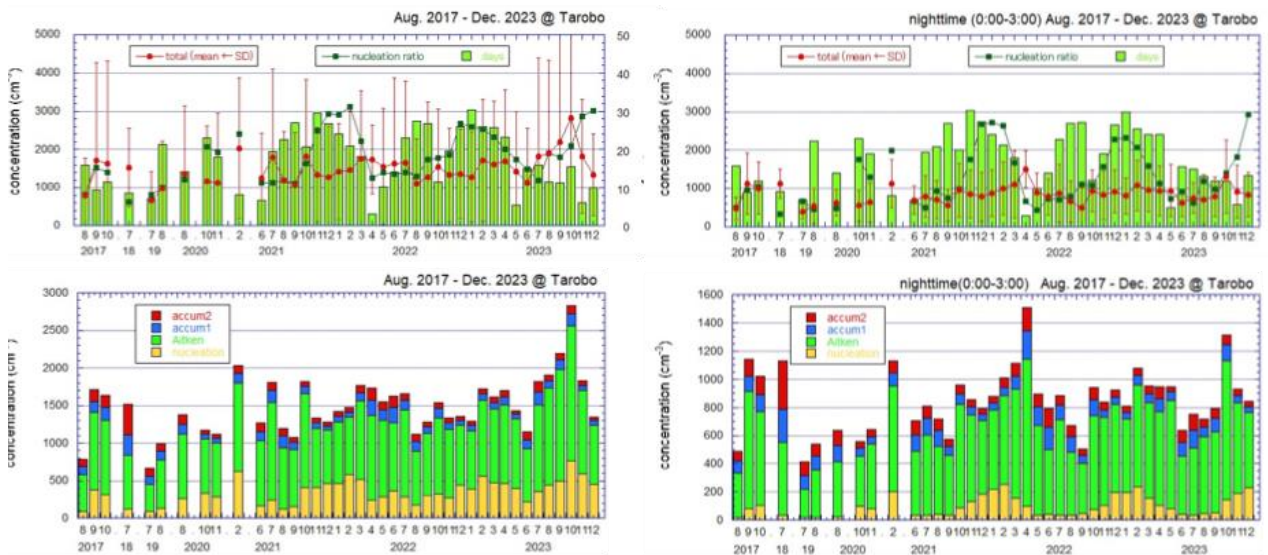


図4 2017年8月~2023年12月まで太郎坊において同じSMPSで測定した総粒子数濃度、核生成モードの割合、測定日数の経年変化(上)とモード別粒子数濃度の経年変化(下)
左:終日データ, 右:夜間のみデータ

車載ライダーでエアロゾルの立体分布を可視化する～富士山一周観測（TR01）

矢吹正教¹，三浦和彦²
1京都大学，2東京理科大，富士山観測研究センター

1. はじめに

PM_{2.5}に代表される大気エアロゾルは、気候や人間の健康など多岐に亘り影響することが知られています。エアロゾル粒子の発生源は、自動車や工場など人間活動に伴い排出される人為起源と、森林や土壌、海面などから放出される自然起源とに大別されます。また、発生源から粒子として放出される「一次粒子」と、ガス状物質として放出されたものが大気中での酸化反応等により粒子化してできる「二次粒子」があります。生成されたエアロゾル粒子は、重力沈降だけでなく、雲粒の核になったり、雲粒や雨滴に取り込まれたりすることで大気中から除去されます。このように様々な過程を経て生成・除去を繰り返しながら大気場により輸送・拡散されるエアロゾルは、時間・空間的に大きく変化するため、その動態を正確に把握するためには多地点での継続した観測が重要となります。

独立峰である富士山では、自由対流圏に位置することが多い山頂から大気境界層内の山麓にかけて観測点を設けた、エアロゾルの高度方向の分布特性の観測に適しています¹⁾。直接観測が行われてきた山頂（標高3776m）と太郎坊（1290m）の間のエアロゾル高度分布の把握を目的として、2013～2019年の夏期に太郎坊にてライダー観測を行いました。大気ライダーはレーザを光源とするレーダー手法であり、直接観測のように多成分の観測はできませんが、高度連続のエアロゾル分布を地上から取得することができます。また、ライダーで計測できるのは、微粒子により光がどれだけ減衰したかを表す後方散乱係数や消散係数になります。この値が大きいほど、光を減衰させるエアロゾルが多く存在したことを示します。

山岳域では、日射のため昼間の上昇流によって、自由対流圏へ下層の汚染された気塊を注入する役割を担う「山岳ポンプ」と呼ばれるプロセスが存在するため、大気境界層高度の日変化の把握が重要となります²⁾。太郎坊でのライダー観測では、①エアロゾル後方散乱係数 β が $0.005\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ を超える高度領域は、日中でも山頂高度までは定常的に達しないこと、②大気境界層上端の遷移層を含む $\beta > 0.002\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 以上となる領域は、日射のある5～6時から18～19時の間に山頂以上の高度域まで広がること、③夜間の大気境界層高度は太郎坊からの高さ1～2km付近で時間によらず比較的安定していることがわかりました（図1参照）。本研究では、富士山周辺の他の地点でも同様の挙動となるかどうかを調べるため、最近開発された車載ライダー³⁾を用いて富士山を中心とする周回観測を実施しました。

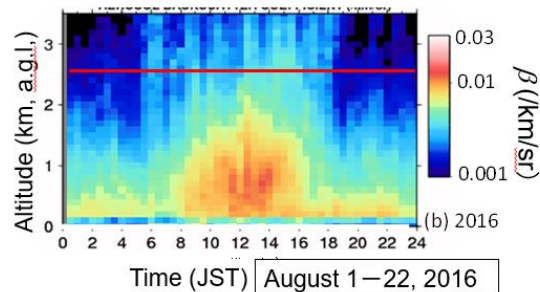


図1 エアロゾル後方散乱係数の平均プロファイルの時間変化（時間分解能30分，高度分解能100 m）：2016年8月1～22日。高さは太郎坊からの地表面高度であり，赤線は富士山頂の高さに対応する。

2. 車載ライダーの概要

観測車は、紫外透過ガラスを備えたハッチ型のライダー専用の開口を備え、開口部の下に微振動を吸収する除振台を設けています。また、最長で50時間の無給電の連続観測に対応しました。これらの工夫により、高速道路を含む多様な場所での運用が可能です。ライダー光源には、射出点でアイセーフ基準を満たす波長355nmのレーザを用いました。解析では、距離分解能7.5m，時間分解能1秒で取得した信号にライダー比50srを仮定したFernald法⁴⁾を適用して消散係数を求めました。各観測点の位置情報は、準天頂衛星対応のGNSS受信機により緯度・経度・高度を取得しました。

3. 観測結果

周回観測は、2023年7月18～19日，および8月19～20日に実施しました。図2(上)に観測ルートを示します。東名御殿場IC付近の駐車場で観測準備を行い，東富士五湖道路と繋がる新御殿場ICを起点として時計回りに富士山を周回しました。1周の走行距離は約100kmで，要した時間は平均で約2時間でした。ここで，富士吉田ICから新御殿場ICまでは高速道，それ以外は一般道での移動となるため等速の観測ではないことに留意が必要です。また，東富士五湖道路には約3kmの竈坂トンネルがあり，その他にも高架や道路上を覆う樹木により計測できない箇所はありましたが，経路全体の9割以上のデータが取得できました。

図2(下)に，2023年7月18日21:30から23:30JSTにかけて実施した周回観測例を示します。1周に2時間を要するため，時間変化も含んだ結果となっていますが，トラックの往来が多い道路付近ではエアロゾル消散係数が高くなるなど

の場所依存がみられました。一方、境界層高度は場所に大きく依存せず高度約2km付近を示し、7月18日の観測では夜間の富士山麓周辺の境界層高度の変動が少ないことが示唆されました。

4. おわりに

現在、車載ライダーに偏光観測などの新しい計測機能の追加を試みています。今後も、富士山周辺を含む様々な場所での観測を継続し、従来のリモートセンシングや地上計測では把握が難しい局所的なエアロゾル分布の立体構造の可視化を進めていきます。

謝辞

富士山太郎坊での観測は 認定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われました。本研究の一部は、JSPS科研費26709042, 19H04238, 20K21844, 22H03732および京大生存圏研究所ミッション研究5-1

の助成を受けました。

参考文献

- 1) 三浦和彦ら(2022). 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—, 第15回成果報告会要旨講演予稿集, pp.14-15.
- 2) 長田和雄, 航空機と山岳大気観測から見た自由対流圏エアロゾル(2000). エアロゾル研究, 15 (4), pp.335-342. <https://doi.org/10.11203/jar.15.335>
- 3) Yabuki et al. (2023). Aerosol Spatial Distribution Observed by a Mobile Vehicle Lidar with Optics for Near-Range Detection, In: Sullivan, J.T., et al. Proceedings of the 30th International Laser Radar Conference, ILRC 2022, Springer Atmospheric Sciences. Springer, Cham, pp 303–309. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37818-8_40, 2023
- 4) Fernald, F. G.(1984). Analysis of atmospheric lidar observations: some comments, Appl. Opt., 23, 5, 652-653. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.23.000652>

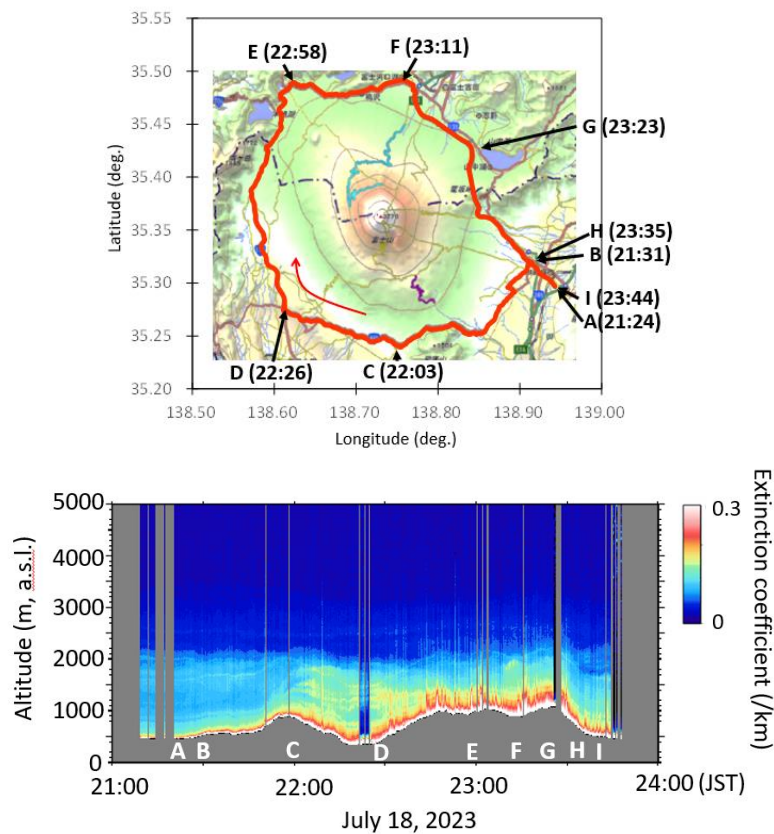


図2 (上) 車載ライダー移動観測の軌跡および各ポイントの通過時刻, (下) エアロゾル消散係数プロファイル: A~Iは上図・移動軌跡の各ポイント通過時刻に対応する (2023年7月18日)。

ドローンで雲をつかむ ～雲滴分析による雲成長過程の研究～ (SR11)

南齋勉, 岡本大地, 藤田壱聖
静岡理科大学 理工学部

1. はじめに

雨雲は雲滴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。雲滴の核形成から、雲滴への大気汚染物質の沈着、雲滴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⁾、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²⁾。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滴や雲滴のサンプリングを行なっている。

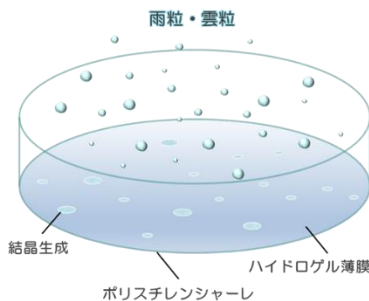


図1 結晶生成を利用した雨粒採取分析ツール

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滴を採取した。また、富士山山頂測候所において、夏期に雲滴採取を行なった。さらに、ドローンサンプリングとして、富士山麓5合目太郎坊から上空150mへの飛行によって、雲滴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。雨滴と雲滴の粒径分布と、液滴中の硫酸塩濃度分布を比較することで、雲滴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。

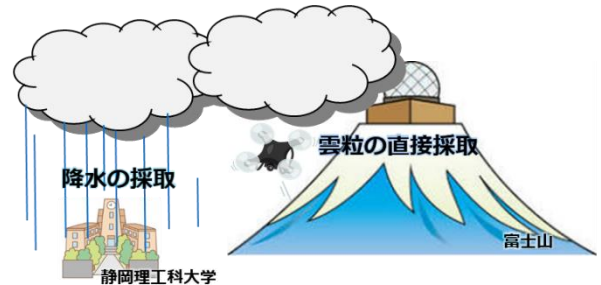


図2 地上と富士山頂におけるサンプリング

2. 採取と観察の方法

採取分析ツールは以下の手順に従い作製した。5mMの塩化バリウム水溶液に5wt%となるように牛骨ゼラチンを加え、加熱しながら1時間攪拌させた。この溶液を内径35mm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7日間静置して製膜乾燥させた後、アルミジップロック内にシリカゲルを同封して保存した。

雨滴の採取は、静岡県西部地域において2023年に観測された降水に対して、本採取ツールを3～10分間ずつ暴露し、数10～数100点の雨滴を経時的に採取した。雲滴採取は、この採取ツールを温湿度センサー(おんどり, T&D社)と併せて小型クアッドコプター(Mavic3, DJI社)に搭載し、約10分間の平均飛行時間で雲滴を直接採取した。採取は2023年3月から12月までの各月、富士山五合目の太郎坊(海拔1290m)にて、150～500 m上空の雲に対して行った。また、富士山頂における雲滴採取として、2023年7月26日から8月23日の期間に富士山測候所で採取された計16試料の雲滴についても同様に解析した。



図3 雲粒採取に用いたクアッドコプター

生成した沈殿物の観察にはデジタルマイクロスコープ (KEYENCE VHX-7000)を用い、撮影した単一雲滴の画像から、画像処理ソフトにより雲滴直径と白色沈殿のピクセル数を計測した。それらの情報から雲滴体積と硫酸塩物質量をそれぞれ見積もることで、個数分布や互いの相関について検討した。

3. 刻一刻と変わる雨の性質

単一雨滴の採取結果の例として、図2 (a) に2023年4月12日15:05~15:31に、静岡県掛川市で観測された降水イベントの初期降雨に対して、採取された雨滴中の硫酸塩濃度と物質量の相関を示す。時間の経過とともに比例関係の相関性が上昇することが分かるが、この相関において比例係数は雨滴体積を示しており、雨滴体積の分布が狭くなっていることが分かる。また、時間の経過とともに高い物質量の分布が増えていることが分かる。硫酸塩濃度の分布は、採取期間を通して 10^{-2} – 10 mmol/L の間で大きく変化していないのに対し、硫酸塩物質量の分布は、 10^{-1} – 10^2 pmol にかけて時間の経過とともに増大していることが分かった。このことから、この降水イベントにおける雨滴の特徴は、雨滴体積分布が狭いパターンから雨滴中の硫酸塩物質量分布が狭いパターンに変遷していることが分かった。図2 (b)は前年の2022年3月26日に浜松市で観測された降水イベントの初期降雨に対して採取された雨滴中の硫酸塩濃度と物質量の相関を示しているが、どちらの分布も変遷の傾向が似ていることが分かる。この支配要因について、雲の移流過程や降水量の比較から共通点が見えてきた。

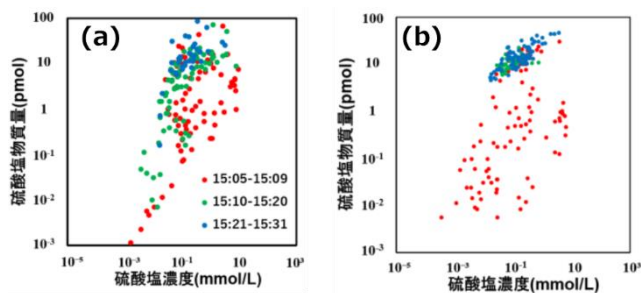


図4 単一雨滴中の硫酸塩濃度と物質量の相関
(a) 2023.4.12 (b) 2022.3.26

4. 1滴の雲滴から雲の成長過程が見えてきた

図4は、2020年12月9日10時、2023年3月2日10時、2023年4月12日13時にそれぞれ太郎坊上空で採取された雲滴の液跡直径分布を示す。いずれの期間においても、同程度の雲滴直径の範囲内に入るものの、その傾向は採取時期によって大きく異なることが分かった。これまでの雲滴経時採取の結果から、雲滴跡の直径分布は時間とともに大きく推移することが分かっており、今回の結果も季節性に依存したものではない

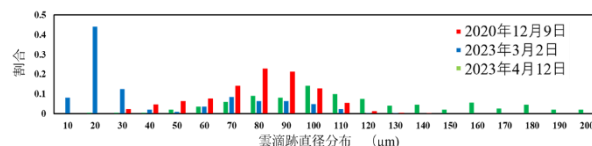


図5 異なる期間に採取された雲滴跡の直径分布

と考えられる。これらの雲滴中に含まれる硫酸塩の濃度と物質量の相関を取ると、いずれの試料についても比例に近い相関関係を示したことから、前述の雨滴の結果と同様に雲滴体積分布が狭い雲だったことが伺える。今回示したこれらの雲はすべて、西方から移流してきた気塊から生成した雲であることを目視で確認しているが雲滴体積分布に差が見られた。昨年までに得られた雲滴を見ると、いずれもこの体積分布が狭いパターンに該当するが、今年採取した雲滴の中には、図4に示した雨滴の結果と同様に、硫酸塩物質量の分布が狭い雲滴の存在も確認された。これらの結果から、雲滴の凝結形成から雨滴に成長する過程で、雲滴がもつ特徴が変遷することが示唆された。

5. おわりに

これまで雨滴には、①雨滴体積分布が狭いパターン、②雨滴中の硫酸塩物質量分布が狭いパターン、③硫酸塩濃度分布が狭いパターンの3種類が存在することが分かっていたが、今回の結果から、時間とともに雨の特徴が変遷して傾向が見られた。また、これまでに見られていた雲滴の解析結果からはパターン①のみが確認されていたが、今回初めて、パターン②の存在が明らかとなってきた。これらの詳細を検討することで、これまで未解明であった雲粒の凝結形成から成長過程の詳細が明らかとなる可能性が示された。

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) B. Nanzai, Y. Goto, Y. Ishida, and M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2019**, 35, 1263.

富士山の噴火に備えよ！小型センサーを活用した火山ガスモニタリング（SR02）

青木紳悟¹, 加藤俊吾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

富士山の最後の噴火から300年が経過しており、いつ火山活動が活発化してもおかしくない。火山ガスには二酸化硫黄(SO₂)や硫化水素(H₂S)が含まれており、これらのガスを常時監視し、住民に注意喚起するシステムが確立できれば、登山客や近隣住民に向けた防災の手助けとなる。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、富士山頂で商用電力が利用できない期間(夏期以外)での測定は困難である。そこで本研究では、バッテリーと小型かつ小電力の電気化学センサー、長距離通信機器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、小型のシステムを構築し、多地点でのモニタリングも行った。

2. 電気化学センサー

本研究では代表的な火山性ガスであるSO₂とH₂Sの測定を行った。小電力で動作するAlphasense社製の電気化学センサー(SO₂-B4およびH₂S-B4)を用いた。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までの低濃度の検出が可能であったが、実際の大気観測においては温度などの影響を受けて数十ppbの変動をしてしまった。

3. 実大気での火山性ガスの検出(観測場所:雲仙温泉, 大涌谷)

測定の際に、火山活動を検知できるか確認するため、箱根大涌谷と長崎県雲仙温泉において大気観測テストを行った。乾電池でセンサーとロガーを動作させた。この結果、火山性ガスの影響が大きい地点では高濃度のSO₂およびH₂Sが検出された(図1)。実大気においても本センサーが

火山活動の影響をとらえる用途に使用できることが分かった。また、大涌谷、雲仙温泉の両地点においてもH₂Sの方がSO₂より高濃度のピークが得られた。

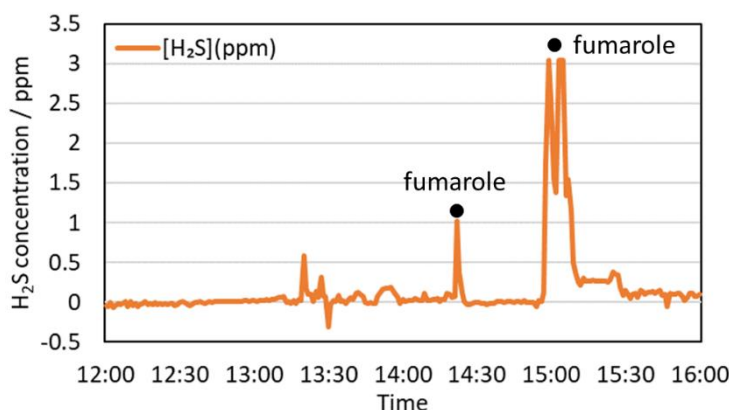


図1. 雲仙温泉で測定されたH₂S濃度

4. 富士山頂における越冬観測

火山噴火はいつ起こるか分からないため、防災のためには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、商用電源を使用できない期間でも測定場所である富士山頂から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機器(LPWA)である。ガスセンサーからの出力はELTRESによって3分毎に送信されており、ウェブサイト上からどこからでも確認できるようにしている。

5. 太郎坊での火山性ガス測定

噴火は山頂以外の火口で起こる可能性があるため、多地点でのモニタリングが実現すれば、より効果的な防災情報を得られる。現在、富士山5合目付近の太郎坊において、一般的なバッテリー1個で稼働するシステムを構築し、運用している。

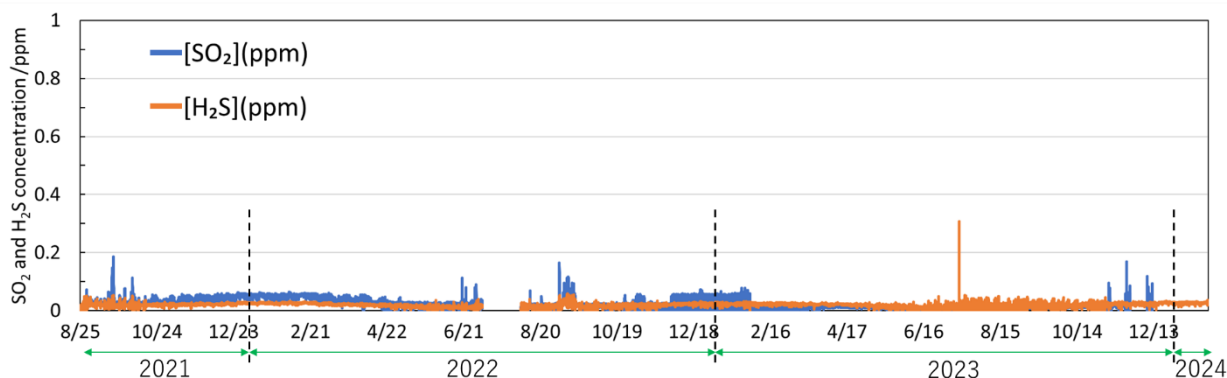


図2. 富士山頂における火山性ガスの濃度記録(2021年8月~2024年1月)

富士山麓の太郎坊におけるCO, O₃, SO₂の長期観測 (SR02)

○野田琴音¹, 加藤俊吾¹, 大河内博², 三浦和彦³, 和田龍一⁴, 皆巳幸也⁵, 鴨川仁⁶

1. 東京都立大学, 2. 早稲田大学, 3. 東京理科大学, 4. 帝京科学大学, 5. 石川県立大学, 6. 静岡県立大学

1. はじめに

富士山は独立峰であるため、自由対流圏に位置する山頂での大気観測は、周辺の人為的排出源の影響をほとんど受けない。したがって、富士山頂での大気汚染物質濃度の測定は、越境大気汚染の評価やバックグラウンド濃度の測定に適している。山頂では、2008年からCO, O₃, SO₂の濃度測定を行なっているが、観測期間は商用電源が利用できる夏の間だけに限られている。そこで、2020年8月から、富士山の中腹に位置する太郎坊にて通年観測を開始した。太郎坊が自由対流圏に位置していれば、商用電源が利用できる夏に限らず、通年で自由対流圏の大気の観測が実現できる。

2. 観測方法

2020年8月から富士山の南東に位置する太郎坊(標高約1300m)にてCO, O₃, SO₂濃度の測定を開始した。COは赤外吸収法, O₃は紫外吸収法, SO₂は紫外発光法を原理とする測器を用いた。(Thermo Environmental Instrument社の Model 48C, Model 49C, Model 43C)。また、CO計とSO₂計については、毎時0~15分にゼロガスを入れベースラインの補正を行なった。

3. 測定結果

太郎坊では、図1に示したようにCO, O₃ともに冬から春は高濃度、夏は低濃度となる季節変動が観測された。また、図2に示したように日中に高濃度、夜間に低濃度となる日内変動が観測された。日中にCO, O₃濃度が高くなる原因は、日中の気温上昇によって、麓の都市部の汚染空気が太郎坊まで運ばれるためだと考えられる。一方、夜間は都市部の影響を受けず、比較的きれいな大気が測定されたと考えられる。したがって、夜間のデータだけであれば、富士山頂のように自由対流圏の大気を観測することが可能であると考えられる。

太郎坊でのSO₂濃度は、夜間は比較的安定しているが、昼間に頻繁にスパイク的なピークが観測された。大気中の主なSO₂の排出源は化石燃料の燃焼と火山ガスである。化石燃料の燃焼が排出源である場合、SO₂の濃度変化はCOの濃度変化と連動するはずである。しかし、太郎坊では、SO₂濃度のピークとCO濃度のピークは連動しておらず、SO₂の排出源は火山ガスであると考えられる。

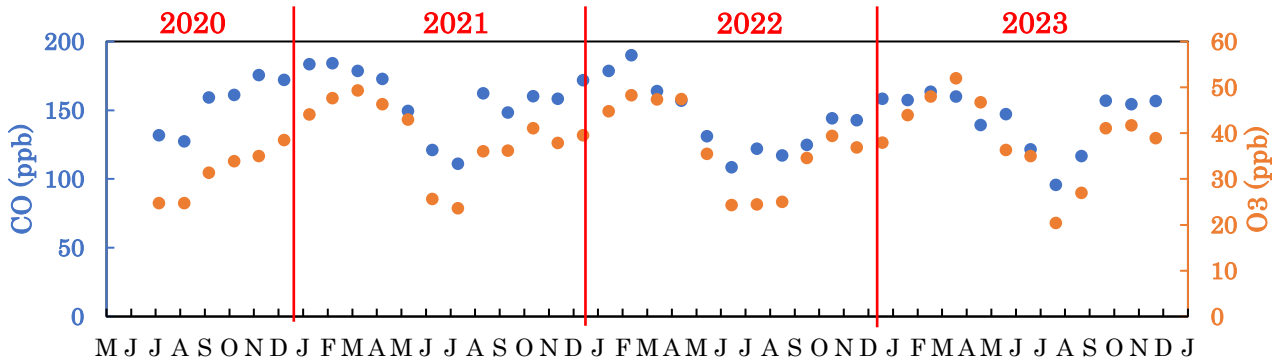


図1 CO, O₃の月平均濃度変動

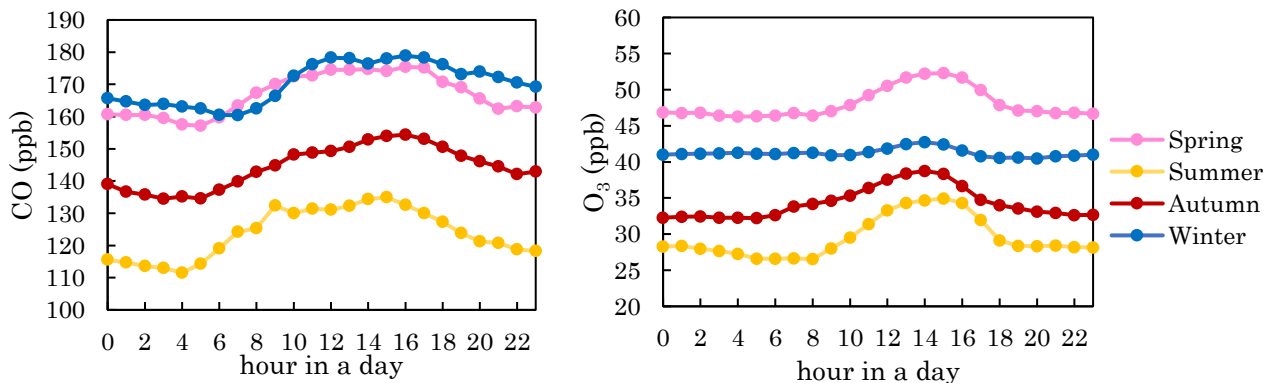


図2 CO, O₃濃度の季節ごとの平均日内変動

富士山太郎坊で山頂と同じ大気汚染物質の濃度を観測できる？ (TT01)

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,畠山史郎¹³,戸野倉賢一¹⁴

1.帝京科学大学,2.大阪公立大学,3.東京都立大学,4.早稲田大学,5.東京理科大学,6.山梨大学,7.石川県立大学,
8.静岡県立大学,9.県立広島大学,10.名古屋大学,11. 気象庁気象研究所,12.富士山環境研究センター,
13.アジア大気汚染研究センター,14.東京大学

1. はじめに

総反応性窒素酸化物(NO_y)から窒素酸化物(NO_x)を差し引いたものをNO_x酸化物質(NO_z)と呼ぶ。自動車や工場などから排出されたNO_xは、大気中の化学反応を通してオゾン(O₃)を生成しながら、一部は、硝酸、硝酸塩といったNO_z構成物質となり輸送される。NO_yは個々の構成物質に比べ、寿命が長いこと、越境汚染の指標として有用と考えられている。NO_yからNO_xを差し引いた化合物群をNO_zと呼ぶ。発表者らは、自由対流圏に位置する富士山頂(以下山頂)にて2017年よりNO,NO₂,NO_y,およびNO_zの観測を行ってきた。しかしながら富士山頂では電力の供給時期に制限があり、観測は夏期のみに限られていた。一方富士山の5合目付近に位置する太郎坊観測所(以下太郎坊)は、年間にわたって電力が供給されており通年観測が可能である。しかし標高は1300m程度であり、自由対流圏を反映した大気を計測できるか不明であった。もし太郎坊で自由対流圏を反映した大気の計測が出来れば、年間を通じた越境汚染の評価が可能となる。本発表では、2023年の山頂と太郎坊の同時観測の結果を報告する。合わせて2021年と2022年の観測結果を加えて考察し、年間を通じた越境汚染の評価の可能性を報告する。

2. 方法

山頂(富士山特別地域気象観測所:高度3776 m)と太郎坊(富士山太郎坊観測所:高度1300m)でNO,NO₂,NO_z,NO_yの観測を行った。観測期間は山頂が2023年8月、富士山太郎坊では2023年1月～12月である。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 42i-TL)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、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(375 nm)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標準ガスを測定することで求め、NO₂計測値の補正に用いた。

3. 結果と考察

2021年～2023年8月の山頂と太郎坊の観測結果を比較した。窒素酸化物濃度は太郎坊では日中に増加する、明瞭な日

変化を示した。山頂と大きく異なる結果となり自由対流圏の結果を得ることは難しいことが分かった。夜間(0:00-3:59)のデータを用いて比較を行った。太郎坊の濃度は夜間では小さく、山頂と同程度であることが分かった。しかし、夜間においても太郎坊では近くの市街地からの影響と思われる高濃度の窒素酸化物が、時折観測され、それらの観測値が観測結果の平均値に大きな影響を与えることが分かった。本年はNO_z濃度に注目し、解析手法を検討した。データの選別方法を検討し、夜間(0:00-3:59)のNO_z濃度の標準偏差が0.1 ppb以上を示した観測値は近傍の影響により急激に濃度が上昇したと考え、棄却した。これらの処理を行った結果、山頂と太郎坊におけるNO_z濃度の相関図における近似直線は傾き 0.91 ± 0.17 ,切片 -0.09 ± 0.05 ppbを示し、相関係数は0.67であった。これら手法を2020年9月～2023年10月の太郎坊における観測結果に適用し、年間における夜間の観測結果を得た。月別のNO_z濃度とデータの得られた日数を図1に示す。夏期に低く、冬期に高くなる季節変化を得た。

4. まとめ

富士山太郎坊での解析手法を検討し、自由対流圏の気塊を反映したNO_z濃度を観測できる可能性があることが分かった。本手法を応用し、2020年から2023年までの自由対流圏濃度を反映した可能性のあるNO_z濃度の季節変化を得た。

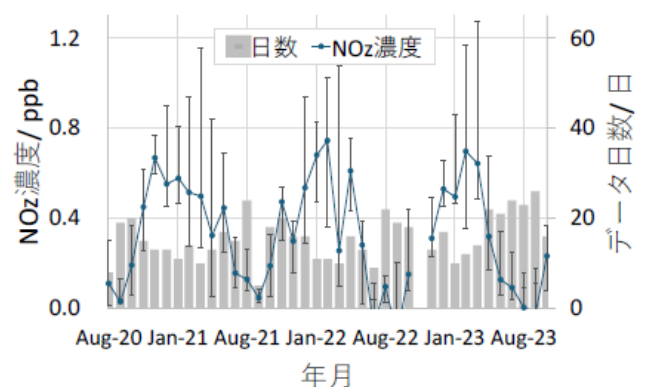


図1. 2020年8月から2023年10月までの富士山太郎坊の夜間のNO_z濃度。



第17回成果報告会講演予稿集

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

