

第14回成果報告会

2007年 - 2020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
共催：東京理科大学総合研究院大気科学研究部門
後援：日本郵便株式会社
一般財団法人新技術振興渡辺記念会
一般財団法人 WNI 気象文化創造センター
東海大学海洋研究所

第14回成果報告会

講演予稿集

主催：認定NPO法人富士山測候所を活用する会
共催：東京理科大学総合研究院大気科学研究部門
後援：日本郵便株式会社
一般財団法人新技術振興渡辺記念会
一般財団法人WNI気象文化創造センター
東海大学海洋研究所

ご挨拶

2007年より毎年行っていた夏季観測は、2020年のコロナ禍で山頂運営の安全確保が不透明ゆえに中止の決断をいたしました。

しかし、認定NPO法人富士山測候所を活用する会では安全確保が行いやすい太郎坊や御殿場において、コロナ禍でも観測を大幅に増強し、コロナ禍でもできることを実践してまいりました。

一方、毎年年度末に行ってきたこの成果報告会ですが、例年は、同年度の夏季観測結果を報告することを行ってまいりました。

しかし、太郎坊や御殿場での観測結果や、2007年以降に得られたデータをフル活用して例年以上に充実した報告会をオンラインにて開催することにいたしました。

本年度の夏季観測中止で本NPOの主収入である利用料が全く入らないため、あわや解散と追い込まれましたが、皆様の御寄付、クラウドファンディングによるご支援でこの危機を乗り越えることができました。

その結果、本日の成果報告会も無事に開催できることになりご支援頂いた皆様にはこの場を借りて厚く御礼を申し上げます。



第14回成果報告会 実行委員長
加藤 俊吾（理事・東京都立大学）

第14回成果報告会 要旨集

実行委員長： 加藤 俊吾(東京都立大学)

副実行委員長： 鴨川仁(静岡県立大学)、皆巳幸也(石川県立大学)

13:00 - 13:05：開会挨拶

13:05 - 13:51：大気(富士山頂)

01	コロナ禍における富士山頂の大気中CO ₂ 濃度	野村渉平, 寺尾有希夫, 向井人史(国立環境研究所)
02	雲水化学観測では富士山頂は世界一！ ：長期観測で見えてきたこと	大河内博, 大力充雄(早稲田大学); 勝見尚也, 皆巳幸也(石川県立大学); 竹内政樹(徳島大学); 戸田敬(熊本大学); 加藤俊吾(東京都立大学); 三浦和彦(東京理科大学); 小林拓(山梨大学); 和田龍一(帝京科学大学); 南齋勉(静岡理工科大学); 土器屋由紀子, 畠山史郎(富士山環境研究センター)
03	微粒子が気候を変える！ ～富士山から見たエアロゾルの気候影響～	三浦和彦, 森樹大, 五十嵐博己, 木村駿, 伊藤佳樹, 齋藤天真, 平野至心, 永野勝裕(東京理科大学); 桃井裕広(千葉大学); 矢吹正教(京都大学); 青木一真(富山大学); 大河内博(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); 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)
04	富士山頂で観測したエアロゾル粒子の雲凝結核への成長	木村駿, 五十嵐博己, 森樹大, 三浦和彦(東京理科大学)

14:00 - 15:14：大気(富士山麓)

05	ちよつと上まで行ってきます ～ドローンで見る太郎坊上空の大気～ (2020年度年賀寄附金配分事業)	皆巳幸也(石川県立大学); 大河内博, 速水洋(早稲田大学); 三浦和彦, 森樹大(東京理科大学); 加藤俊吾(東京都立大学); 和田龍一(帝京科学大学); 小林拓(山梨大学); 南齋勉(静岡理工科大学)
06	富士山麓から放出される植物由来ガス観測をマルチコプターで初挑戦！ ：夏季に向けて冬季にチャレンジ	石川翔, 大河内博, 速水洋(早稲田大学); 勝見尚也, 皆巳幸也(石川県立大学); 竹内政樹(徳島大学); 戸田敬(熊本大学); 加藤俊吾(東京都立大学); 三浦和彦(東京理科大学); 小林拓(山梨大学); 和田龍一(帝京科学大学); 南齋勉(静岡理工科大学); 土器屋由紀子, 畠山史郎(富士山環境研究センター); 山本祐志, 三阪和弘(グリーンブルー株式会社)
07	2020年富士山太郎坊における窒素酸化物の計測	和田龍一, 松田響(帝京科学大学); 定永靖宗(大阪府立大学); 加藤俊吾(東京都立大学); 大河内博(早稲田大学); 森樹大, 三浦和彦(東京理科大学); 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); 松本淳(早稲田大学); 米村正一郎(県立広島大学); 松見豊(名古屋大学); 梶野瑞王(気象研); 土器屋由紀子(富士山環境研究センター); 畠山史郎(アジア大気汚染研究センター)
08	富士山麓太郎坊でのCO, O ₃ , SO ₂ の測定	矢田茂久, 加藤俊吾, 辰巳紘奨, 植山光樹, 橋間美弥(東京都立大学)
09	富士山麓で夏季豪雨の実態解明にチャレンジ！ ：地球温暖化と大気汚染の相乗効果解明を目指して	米戸鈴美香, 大河内博(早稲田大学); 井川学, 岩崎貴也(神奈川大学); 戸田敬(熊本大学); 高橋善幸, 清水英幸(国立環境研究所); 佐瀬裕之(アジア大気汚染研究センター); 村田浩太郎(静岡県立大学); 藍川昌秀(北九州市立大学); 家合浩明(新潟県保健環境科学研究所); 栗林正俊(長野県環境保全研究所)
10	富士山麓で冬季の大気中マイクロプラスチック観測に初挑戦！ ：新規サブミクロン赤外分光法(O-PTIR)の活用	趙鶴立, 大河内博, 吉田昇永, 速水洋(早稲田大学); 勝見尚也, 皆巳幸也(石川県立大学); 竹内政樹(徳島大学); 小林拓(山梨大学); 加藤俊吾(東京都立大学); 三浦和彦(東京理科大学); 和田龍一(帝京科学大学); 南齋勉(静岡理工科大学); 宮崎あかね(日本女子大学); 緒方祐子(柴田科学); 小林華栄, 浦山憲雄(日本サーマル・コンサルティング); 新居田恭弘(パーキンエルマージャパン); 山本衛(日本分光)
11	東京神楽坂および富士山麓で測定した気柱全体のエアロゾルの光学特性・微物理特性	齋藤天真, 三浦和彦, 森樹大(東京理科大学); 桃井裕広(千葉大学); 青木一真(富山大学)

15:25 - 16:25：雷・噴火など

12	雷雲の中に潜り込める世界最先端の雷研究の地, 富士山	鴨川仁(静岡県立大学); 大気電気・雷研究グループ
13	雷雲と宇宙の間で起こる放電発光, スプライト・エルプスらを絶景の富士山から観察する	鈴木智幸, 鴨川仁(静岡県立大学, 東海大学); 長尾年恭(東海大学)
14	富士山雷観測によるリーダの進展モデル	安本勝(富士山環境研究センター); 鴨川仁(静岡県立大学); 佐々木一哉(弘前大学); 土器屋由紀子(富士山環境研究センター)
15	富士山の噴火予測観測をNPOLレベルで目指す～静岡県では初の全磁力観測～	長尾年恭, 佐柳敬造(東海大学海洋研究所地震予知・火山津波研究部門); 鴨川仁(静岡県立大学グローバル地域センター地震予知部門)
16	富士山頂で火山ガス越冬モニタリング：富士山噴火に備える	加藤俊吾, 高橋智樹(東京都立大学); 鴨川仁(静岡県立大学); 土器屋由紀子(富士山環境研究センター); 荒島謙治, 西出葵嘉, 尾花文一(ソニーセミコンダクタソリューションズ)

コロナ禍における富士山頂の大気中 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

過去に東北大学と気象研究所により、それぞれ実施された富士山頂で大気中二酸化炭素(CO₂)濃度の観測により、富士山頂の大気中 CO₂ 濃度は、東アジア域のバックグラウンド濃度であることが示唆された。しかし上記の観測で使用された富士山測候所は、2004年に定常的な電力の供給が停止され、それに伴い富士山頂での CO₂ 濃度観測が中断された。

国立環境研究所は、富士山頂での CO₂ 濃度観測の再開を目的に、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駆動の CO₂ 濃度観測システムを開発した。2009年に富士山測候所にそのシステムを設置し、富士山頂の CO₂ 濃度観測を開始した。本報では、2009-2021年(約11年間)の CO₂ 濃度観測結果、およびコロナ禍での富士山頂での CO₂ 濃度観測結果を報告する。

2. 2020年-2021年の CO₂ 濃度観測

2020年の夏期は富士山頂への登山道が閉鎖され、その影響により商用電源を旧測候所に供給できなかった。そのため、毎年実施していた CO₂ 検出部の交換とバッテリーの充電が実施できなかった。そのため今年度の越冬期間は、フル充電されていないバッテリーにより CO₂ 濃度観測を実施している。現在のバッテリー電圧は、これまでの観測期間で最も低下しているが、2021年3月現在、CO₂ 濃度観測システムは停止していない。

3. 2009年-2021年の CO₂ 濃度

2021年2月の富士山頂の CO₂ 濃度月平均値は416.6 ppmであり、北半球中緯度の大气中 CO₂ 濃度を示すマウナロア観測所の CO₂ 濃度(415.2 ppm)より1.4 ppm高かった。2010年代の前半の CO₂ 濃度増加率(1年間の増加する CO₂ 濃度)は2.2 ppmであったのに対し、2010年代の後半の CO₂ 濃度増加率は2.6 ppmであり、CO₂ 濃度増加率は増加傾向にあった。

4. コロナ禍での CO₂ 濃度

新型コロナウイルスの感染拡大を防ぐために、2020年1月に中国大陸でロックダウンが実施され、その後、複数の国がロックダウン等の人間活動の制限を実施した。これにより、

2020年の人為的に排出される CO₂ 量は前年比で若干低下したと推定されている。

図2に2020年と例年(2010-2019年)の1月から4月の国立環境研究所が運用する観測点(北海道落石岬、富士山頂、沖縄県波照間)とマウナロア観測所の CO₂ 濃度差(Δ CO₂)を示した。富士山頂の2010年から2019年の Δ CO₂ は2月に大きな低下は見られなかったが、2020年の Δ CO₂ は2月に大きく低下した。

北海道落石岬では2020年2月に Δ CO₂ の低下はなく、例年(2010-2019年)と同様の推移を見せた。一方、沖縄県波照間の2020年の Δ CO₂ は富士山頂の Δ CO₂ と同様の低下が見られた。

富士山頂と波照間の大气中 CO₂ 濃度は、中国から人為的に排出された CO₂ の影響を強く受けているため、中国の人為 CO₂ 排出量が低下したことにより、両者の Δ CO₂ 濃度が低下したと考えられる。

富士山頂の Δ CO₂ 濃度の推移が波照間の Δ CO₂ 濃度の推移より Global carbon project (GCP) で推計された中国の人為 CO₂ 排出量の低下量の推移に類似していたことは、波照間が低標高であり、中国の特定の地域(沿岸域)の影響を相対的に強く受ける一方、富士山頂は、自由対流圏に位置し、中国の広範囲の CO₂ 排出量の変化を捉えているためだと考えられる。

2015年に締結されたパリ協定を契機に、各国が人為 CO₂ 排出量を低減させる政策を策定している。その政策の効果等を検証するためには、人為 CO₂ 排出量の低下を検証する方法の構築が求められる。富士山頂とマウナロア観測所の大气中 CO₂ 濃度の比較から、モデルを使用せずに中国の人為 CO₂ 排出量の低下を検出できる可能性が示唆された。

4. おわりに

現行の CO₂ 濃度観測システムの課題は、消費電力量の関係から毎日短時間(22:00-23:30)しか計測できないことである。国立環境研究所では富士山頂での毎日の測定時間を延長することを図るために、2017年から消費電力量を大幅に抑制した測定部を開発してきた。今年度は、期待した消費電力量抑制が備わった測定部の製作を実施した。2021年度の夏期観測期間に新たな測定部を試験的に導入し、2022年度から、その測定部を観測システムに導入することを目指す。

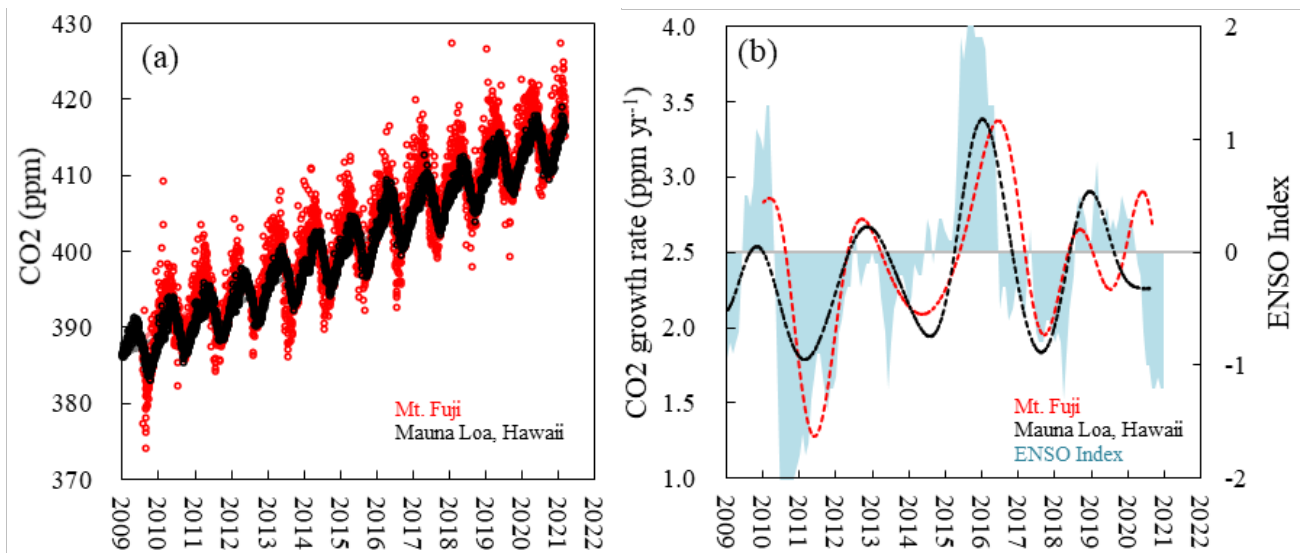


図1. 2009年から2021年の富士山頂とマウナロア観測所の(a)大気中CO₂濃度および(b)CO₂濃度増加率とENSO Index

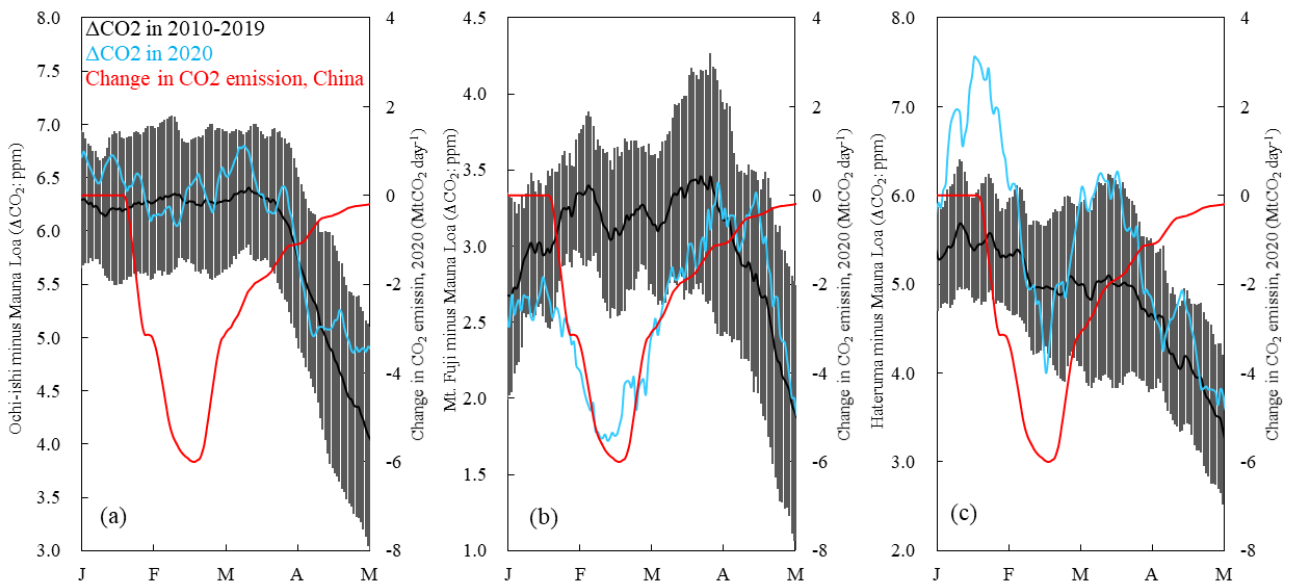


図2. 2020年1-4月の中国における人為CO₂排出量の低下量と2010年から2019年と2020年の1月から4月の(a)北海道落石岬観測所とマウナロア観測所, (b)富士山頂とマウナロア観測所, (c)沖縄波照間観測所とマウナロア観測所のCO₂濃度差(ΔCO₂)

雲水化学観測では富士山頂は世界一！：長期観測で見えてきたこと

大河内博¹, 大力充雄¹, 勝見尚也², 皆巳幸也², 竹内政樹³, 戸田敬⁴, 加藤俊吾⁵, 三浦和彦⁶, 小林拓⁷, 和田龍一⁸, 南齋勉⁹, 土器屋由紀子¹⁰, 畠山史郎¹⁰

1.早稲田大学, 2.石川県立大学, 3.徳島大学, 4.熊本大学, 5.東京都立大学, 6.東京理科大学, 7.山梨大学, 8.帝京科学大学, 9.静岡理工科大学, 10.富士山環境研究センター

1. はじめに

世界的にも 3000 m 以上の高所で大気化学観測を行える場所は限られています。日本最高峰の富士山はスマートな山体を有する孤立峰であり、標高が 3776 m です。富士山頂は高度が高いので、日本国内の地上大気汚染の影響を受けにくく、森林限界よりも高いので地球大気観測を行うことが可能です。一般に、高度 2000 m より上空は自由対流圏と呼ばれており、地上の影響を受けにくく、風が強いために地球表層を巡る輸送場となっています。これまで、当 NPO では、大気中の二酸化硫黄、オゾン、一酸化炭素、窒素酸化物、二酸化炭素、PM2.5 など様々な大気汚染物質の観測を行い、越境大気汚染、地球規模汚染の実態解明を行ってきました。

一方、雲粒はガスや粒子状大気汚染物質を濃縮する働きがあります。大気汚染物質が雲粒に溶け込むと、その粒径分布にも影響を与えます。雲粒の粒径分布の変化は太陽光の反射率や降雨量分布を変化させ、地球環境に重大な影響を及ぼす可能性があります。しかし、これまで 2000 m を越える上空における雲水化学特性の実態は明らかになっていませんでした。富士山頂は夏季に頻繁に雲に覆われますので、自由対流圏の雲水化学特性を調べるのに最適な環境です。また、山頂は森林限界以上にあることから、樹木の影響を受けません。ここでは、雲水化学の長期観測から何が分かってきたのかをご紹介します。

2. 雲水 pH は越境大気汚染を知るリトマス試験紙

図 1 には、世界 162 地域における雲水観測地点をまとめるとともに、高度 3000 m を越える観測地点の雲水 pH の経年変化も示しています。

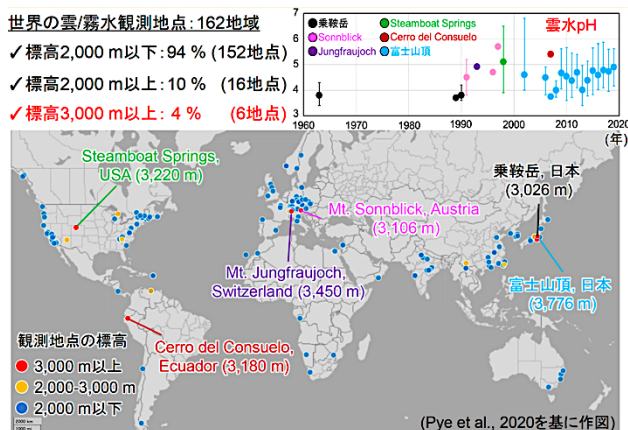


図 1 世界の山間部における雲水化学観測

世界的にみると、山体を利用した雲（霧）水化学観測は高度 2000 m 以下が大部分であり、3000 m を越えるのはわずか 6 点にすぎません。そのなかでも、富士山頂は世界最高峰の観測地点です。

図 1 には、富士山頂での夏季における雲水 pH の経年変動を、世界における高度 3000 m 以上の雲水 pH とともに示していますが、富士山頂の観測が自由対流圏で最も長く行われている観測であることが分かります。富士山頂の雲水 pH の変動幅は大きいものの、全体として上昇傾向にありました。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。この理由は図 2 に示すように、硫酸濃度が低下しているためです。

2. 雲水 pH の増加は二酸化硫黄排出量の減少を反映

図 2 左には、大陸から空気が運ばれてきたときに発生した雲水について、pH、硝酸イオンおよび非海塩起源硫酸イオン濃度の頻度分布を 2013 年以前（過去）と 2014 年以降（近年）に分けて示しています。過去には pH 5 以下でしたが、近年は pH 5 を上回ることも多く、非海塩起源硫酸イオン濃度が 15% 減少したのに対し、硝酸イオン濃度は反対に 8% 増加しました。これは、近年の中国における SO₂ 濃度の減少と、NO₂ 濃度の上昇とよく対応していました。

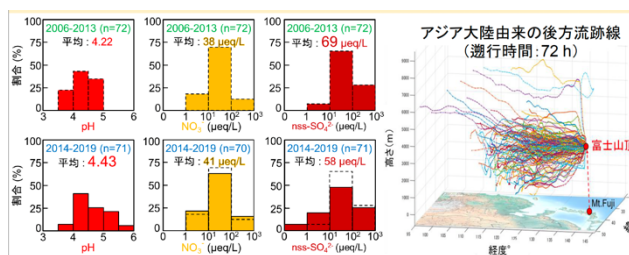


図 2 大陸由来の空気塊で発生した雲水 pH と酸性物質濃度の頻度分布

5. おわりに

富士山頂のように風が強ければ、電源を用いずに雲水を採取することが可能で、前処理もろ過をするだけで機器分析が簡単に行えます。雲水を長期観測すると、越境大気汚染の状況を把握することができます。

ここでは、酸性物質について述べましたが、発表では雲水に含まれる重金属やレアアースなど微量な金属元素分析から何が分かるのかを紹介したいと思います。

微粒子が気候を変える！ ～富士山から見たエアロゾルの気候影響～

○三浦和彦¹, 森 樹大¹, 五十嵐博己¹, 木村 駿¹, 伊藤佳樹¹, 齋藤天真¹, 平野至心¹, 永野勝裕¹, 桃井裕広², 矢吹正教³, 青木一真⁴, 大河内博⁵, 加藤俊吾⁶, 和田龍一⁷, 小林 拓⁸, 皆已幸也⁹, 鴨川仁¹⁰

1.東京理科大学, 2.千葉大, 3.京都大学, 4.富山大学, 5.早稲田大学, 6.東京都立大学, 7.帝京科学大学, 8.山梨大学, 9.石川県立大学, 10.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。野村さんの発表にありましたように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)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、地球温暖化というと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。NPFメカニズムを調べるためには、自由対流圏での連続観測が求められていました。山で測ろうか！

そんな折、気象研究所の五十嵐康人氏から、「富士山測候所が無人化する前に見学しませんか」というメールが届きました。2004年8月11日のことでした。渡りに船とはこのことです。山頂まで登る自信がないので最初は躊躇しましたが、ブルドーザーで登るということで参加しました。そして2006年の夏から富士山頂での観測が始まりました。

2. 新粒子生成

富士山頂(3776m)における旧気象庁測候所において、夏期のみですが2006年～2019年まで、粒径約10～5000nmの大気エアロゾルの乾燥粒子の個数粒径分布を走査型移動度粒径測定器(SMPS)と光散乱式粒子計数器(OPC)を用いて測定しました。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図1に示します。総粒子数濃度は2006年～2019年の14

年の間に約4分の1に減少しています。特に核生成モードの減少が著しいようです。

核生成モードのエアロゾルはNPFにより生成されますがイベントが起こると急激に高濃度になります。核生成モードが減少する原因としてNPOイベントの発生率が減少したのか、一度のイベントにより発生する粒子数が減少したのかが考えられます。2006年から2019年のイベントの発生率の経年変化を表1に示します。富士山頂におけるイベントは、2006年から2019年の全観測期間453日中291回観測されました。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ています(図2)。成長率(GR)は1.7～14.7nm/hとなり、夜間より日中のGRの値が約1.3倍大きいことがわかりました。GR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が発生していることが示唆される結果が得られました。この結果から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ました。(五十嵐ら, 2020)

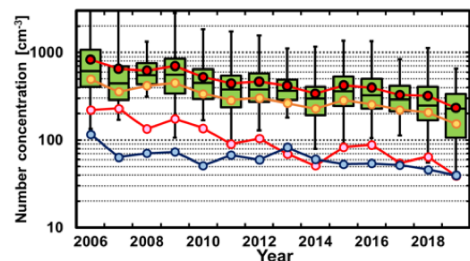


図1 総粒子数濃度の箱ひげ図・平均値(黒枠赤丸)と各モード(核生成モード(赤), エイトケンモード(黄), 蓄積モード(青))の平均値の経年変化(五十嵐, 2020)

表1 2006～2019年におけるイベント発生率・昼夜イベント発生回数
日中：5～19時 夜間：19時～翌5時

Year	Sample days	Total events		Daytime events		Nighttime events	
		Times	Fraction [%]	Times	Fraction [%]	Times	Fraction [%]
2006	23	11	47.8	8	72.7	3	27.3
2007	25	20	80.0	5	25.0	15	75.0
2008	20	12	60.0	3	25.0	9	75.0
2009	33	28	84.8	8	28.6	20	71.4
2010	33	23	69.7	9	39.1	14	60.9
2011	41	28	68.3	14	50.0	14	50.0
2012	31	25	80.6	7	28.0	18	72.0
2013	35	22	62.9	6	27.3	16	72.7
2014	25	8	32.0	4	50.0	4	50.0
2015	32	21	65.6	8	38.1	13	61.9
2016	39	27	69.2	21	77.8	6	22.2
2017	36	20	55.6	19	95.0	1	5.0
2018	39	25	64.1	22	88.0	3	12.0
2019	41	21	51.2	11	52.4	10	47.6
Total	453	291	64.2	145	49.8	146	50.2

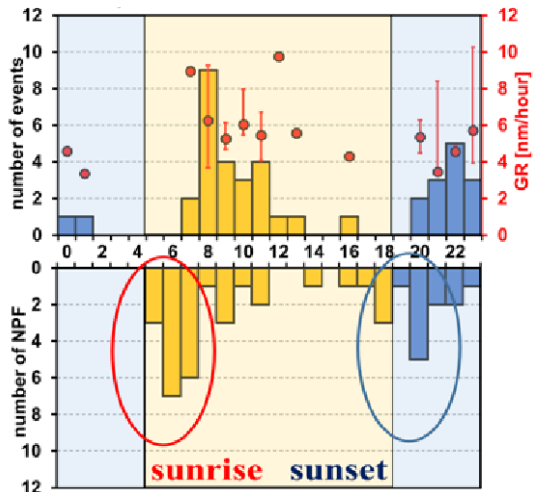


図2 富士山頂の新粒子生成イベントの発生率の経年変化と発生時刻（五十嵐、2020）

3. 粒子の成長

粒子数濃度の増減は直接効果にとって重要ですが、全ての粒子が雲凝結核 (CCN) として活性化するわけではありません。活性化臨界直径は自然条件の過飽和度において 50~150nm と報告されていますが、80nm 以上の粒子数濃度 (N_{80}) を CCN チャンバー (CCNC) で測定した実際の CCN 数濃度の代わりに、潜在的な CCN 数濃度として用いられます。図3に NPF イベント時の粒径分布の時間変化を示します。イベントの後モード径が 80nm を超えるまで成長しています。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 8 例、観測されました。図4にイベント前後の N_{80} の増加数濃度、増加率を示します。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ですが、増加率は 150~350% と他の観測点と同程度であることがわかりました。（木村ら、2021）

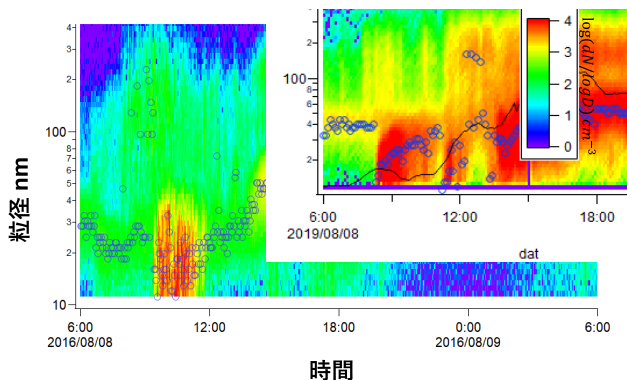


図3 モード径が80nmまで成長した粒径分布の例（木村ら、2021）

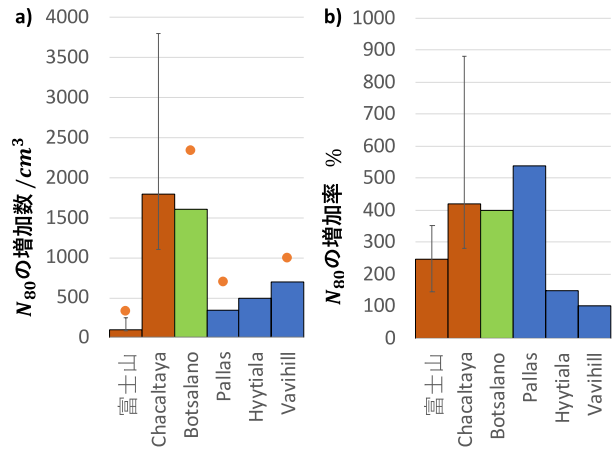


図4 いくつかの観測点でのNPFによる N_{80} のa)増加数濃度とb)増加率の中央値。エラーバーの下限と上限はそれぞれ第一四分位数と第三四分位数を表す。

4. 雲凝結核と吸湿パラメータ

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ですが、雲粒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雲粒数を推定できる可能性が示されました（渡辺ら、2013）。そのため、さまざまな地域でCCN特性を測定する必要があります。そこで、都市大気に関しては東京スカイツリー458m (TST)において、山岳大気に関しては富士山頂にある気象庁旧測候所においてCCNCで測定しました。どちらのプラットフォームも雲に覆われることが多く、雲生成過程の実験所として最適です。化学組成を表す吸湿パラメータ (κ) の値は、富士山頂では約0.4であるのに対し、TSTでは約0.2であり、CCNとして活性化しやすいことが示されました（図5）（佐藤ら、2018）。

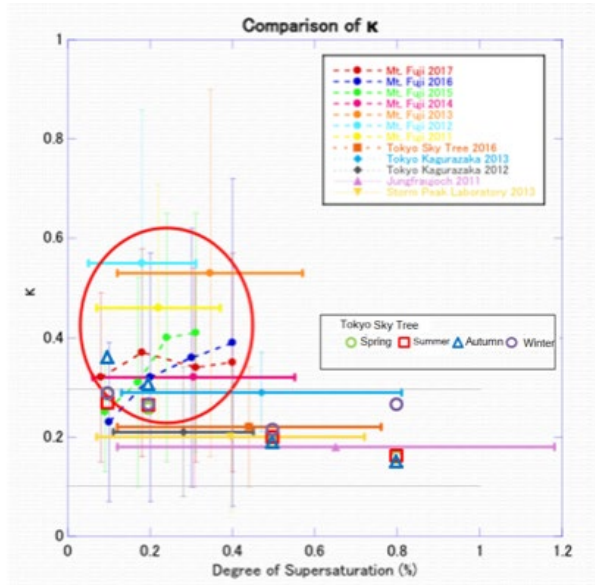


図5 各地における κ の値（佐藤ら(2018)を修正）

5. 実大気中の過飽和度と雲粒有効半径

では実際に雲粒(CD)になるのでしょうか。

CCNC を用いて 4 つの設定過飽和度(SS=0.08, 0.18, 0.31, 0.40%)で CCN を測定しました。各設定過飽和度の CCN 数濃度と CD 数濃度の関係を図6に示します。1:1ラインに近い部分(赤枠)においては設定過飽和度が実大気中の過飽和度に近いことを示しています。CCN 数濃度よりも CD 数濃度が高い場合(青枠)には、設定過飽和度が実大気中の過飽和度よりも低かったことを表しています。逆に CCN 数濃度よりも CD 数濃度が低い場合(緑枠)には、設定過飽和度が実大気中の過飽和度よりも高かったと考えられます。図6から富士山頂における大気中の過飽和度は 0.18%前後だと推定されました。

大気中の水蒸気量(雲水量; LWC)が一定の時、CCN 数濃度が高い程、CD 有効半径(R_{eff})が小さくなることが予想されます。多くの小さい CD からなる雲は少しの大きい CD からなる雲より散乱強度が強くなり雲としての寿命も長いので、雲の冷却効果が強くなると言われています(Tomey 効果)。このことが富士山頂でも成立するかどうかを確認するために、過飽和度 0.18%の時の CCN 数濃度

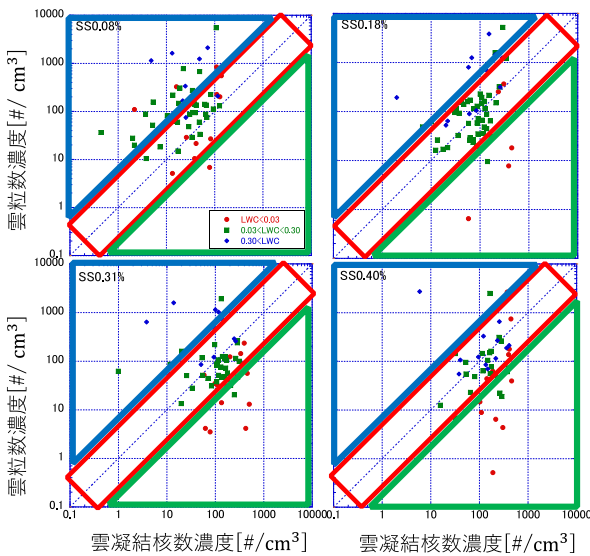


図6 雲水量別の CCN 数濃度と CD 数濃度の関係

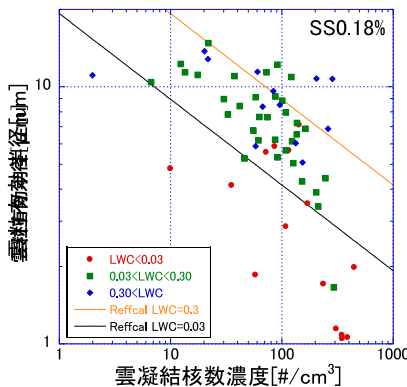


図7 雲水量別 CCN 数濃度と CD 有効半径の関係

と R_{eff} の関係を調べました(図7)。LWCの違いによりデータのマークを変えました。CCN 濃度が大きいほど R_{eff} が小さくなること、LWC が少なくなるほど R_{eff} が小さくなることが確認できました。図7には理論計算で求めた $LWC=0.03\text{mg/m}^3$ の時の関係を黒色線、 0.3mg/m^3 の時の関係を橙色線で示しました。この範囲内に相当する LWC の実測値(緑色)が含まれており、理論値と実測値がおおよそ一致することがわかりました。

6. おわりに

2006年~2019年の夏期の富士山頂での観測により、粒子濃度の経年変化、新粒子生成、雲凝結核への成長、雲凝結核、実大気中の過飽和度、雲粒の有効半径について多くの知見を得ることができました。しかし、富士山頂のNPFは夜間に起こることも多く、そのメカニズムはまだわかっていません。気塊の輸送過程を調べるために、流跡線解析やトレーサーとしてラドン濃度を測定し比較検討しました(横山ら, 2019)。また垂直分布の情報を得るために、係留気球、ゾンデ、ドローンによるその場観測や、スカイラジオメータ(桃井ら, 2020; 新沼ら, 2020; 齋藤ら, 2021)、ライダーによるリモート観測も行いました。前駆ガスとの反応、エアロゾルの化学組成(市毛ら, 2019)も含め、今後、メカニズムについて検討していきます。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究A(17201007)(代表五十嵐康人, 2005-2007年度)、基盤研究C(22510019, 25340017)(2010~2015年度)、東京理科大学特定研究助成金共同研究(2008, 2011, 2013~2014, 2016年度)、東京理科大学総合研究機構山岳大気研究部門・大気科学研究部門活動経費・活動補助費(2011~2020年度)、名古屋大学太陽地球環境研究所「地上ネットワーク観測大型共同研究」(2013~2016年度)、京大生存圏ミッション研究(2016年度)、公益財団法人栗井英朗環境財団奨励金(2016年度)、千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用(2020)の助成により行われた。

参考文献

- 1) 五十嵐ら(2020), 第13回成果報告会講演予稿集, 33-36.
- 2) 木村ら(2021), 第14回成果報告会講演予稿集.
- 3) 渡辺ら(2013), 第6回成果報告会講演予稿集, 50-51.
- 4) 佐藤ら(2018), 第11回成果報告会講演予稿集, 42-43.
- 5) 横山ら(2019), 第12回成果報告会講演予稿集, 42-43.
- 6) 小菅ら(2018), 第11回成果報告会講演予稿集, 44-45.
- 7) 桃井ら(2020), 第13回成果報告会講演予稿集, 31-32.
- 8) 新沼ら(2020), 第13回成果報告会講演予稿集, 62-63.
- 9) 齋藤ら(2021), 第14回成果報告会講演予稿集.
- 10) 市毛ら(2019), 第12回成果報告会講演予稿集, 44-45.

富士山頂で観測したエアロゾル粒子の雲凝結核への成長

木村駿(B4), 五十嵐博己, 森樹大, 三浦和彦
東京理科大学

1. はじめに

大気中に浮遊するエアロゾル粒子は、直接及び間接的に地球の熱放射収支に影響を及ぼす。しかしその推定値には、大きな不確かさがあり、エアロゾルの発生から雲粒成長までの一連の過程の理解が必要である。エアロゾル粒子には直接排出される一次粒子と前駆ガスの化学反応などにより生成される二次粒子がある。この二次粒子の生成過程を新粒子生成(NPF : New Particle Formation)という。発生したこれらのエアロゾル粒子は凝集及び凝結によって成長し一部が雲凝結核(CCN : Cloud Condensation Nuclei)として活性化。これらの一連の過程は観測的な理解が乏しく、地球の放射強制力の推定値の不確かさの原因となっている。そこで、本研究では 2014~2019 年の夏季富士山頂(3776m a.s.l.)における山岳大気のエアロゾル粒径分布の観測から NPF によって発生した粒子と CCN 数濃度の関係を明らかにする。富士山頂は、人間活動の影響を受けづらく、自由対流圏のバックグラウンド大気を観測できる利点がある。

2. 方法

2014年から2019年までの夏季(7, 8月)に、富士山特別気象観測所(35.361N, 138.727E, 3776 m a.s.l.)においてエアロゾル個数粒径分布測定装置(① SMPS3034, ②DMA3081+CPC3775; TSI)を用い、大気観測を行った。解析には、拡散ドライヤーにより相対湿度 30%以下に乾燥させた粒径①10.4~469.8nm②14.9~626.4nmのエアロゾル個数粒径分布を連続測定したデータを用いた。

本研究では、NPF による CCN 数濃度の寄与を定量的に調べるために、NPF イベントと CCN 数濃度を表す N_{80} を以下のように定義した。まず、NPF イベントは、核生成モード(粒径 25nm 以下)の粒子が NPF により発生したものと仮定して、核生成モードにおいて高濃度(核生成モードの数濃度のその年の平均値の二倍)が一時間以上続いたものと定義した。また、mode 径が 25nm 以上まで成長したイベントとそうでないイベントを分けて、それぞれ Class I イベント、Class II イベント(apple or burst)と分類した。イベント中に mode 径が測定範囲の下限にあり続けたものは欠測とした。こういったイベントは測定範囲外で NPF が起きていると考えられる。CCN 数濃度を表す N_{80} は個数粒径分布の内 80nm より大きい粒子の総数濃度の三十分平均値とし、イベント開始時 N_{80init} とイベント中の最大値 N_{80max} 用い、CCN 数濃度変化を以下の 2 つの式で評価した。

$$\text{増加数濃度} = N_{80max} - N_{80init} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{増加率} = \left(\frac{N_{80max}}{N_{80init}} \right) \times 100 \%$$

基礎的な理論では、雲粒の活性化直径の下限は自然条件での過飽和度において 50~150nm である^{1,2)}。 N_{80} は、潜在的な雲凝結核数濃度を表す。この間接的な方法は、CCN チャンバーを用いた観測³⁾による実際の CCN 数濃度の代わりに、潜在的な CCN 数濃度を推定するものであり、イベント中に大気に現れる新しい粒子と既存の粒子の合計を大まかに見積もるものである。

解析する NPF イベントは次のように選んだ。第一に、Class I の NPF イベントのみ、すなわち粒子の成長がはっきりとわかるものについて行った。第二に次のようなイベントは除外した。すなわち、成長途中に欠測のあったイベント、NPF 後 mode 径の成長が見られるが N_{80max} が N_{80init} を超えなかったイベント、また、一日に複数回イベントが起きたイベントでは N_{80init} を一つのイベントの開始時の N_{80} とし、 N_{80max} を最後のイベント中の最大の N_{80} とした。

また、観測したエアマスの輸送経路を調べるために、後方流跡線解析(NOAA Hysplit Model; <https://ready.arl.noaa.gov/>)を行った。出発地点を富士山頂の高度とし、三日間さかのぼって計算した。さらに、測定した粒径分布を必要に応じて対数正規分布の重ね合わせで表し、その粒径分布から mode 径を計算した。

3. 結果と考察

表1は、イベントの分類をまとめたものである。分類に加えて、 N_{80} の増加を次の方法でも評価した。イベント開始時刻を境にそれ以前の 2 時間とそれ以降の 2 時間の N_{80} の平均値をそれぞれ計算し、その値が増加したイベントを数えた。

表1 2014-2019年における観測日数およびイベント数とイベント分類、 N_{80} 増加例

year	Sample days	Total event	Class I	Class II	N_{80} 増加	欠測
2014	25	11	6	5	6	0
2015	32	20	7	10	9	3
2016	36	19	4	4	6	11
2017	36	26	17	7	16	2
2018	39	15	6	6	12	3
2019	41	22	11	10	11	1
計	209	113	51	42	60	20

CCN 数濃度の NPF イベント前後の変化は、第一四分位数と第三四分位数の幅で表すと、47-234 cm^{-3} 増加し、その増加率は 123-302 % だった。この結果と先行研究^{4,5)}による NPF 前後での CCN 数濃度 N_{80} 変化を図 1 にまとめた。

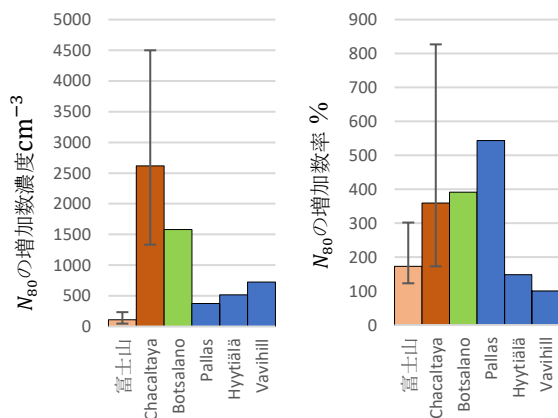


図1 いくつかの観測点でのNPFによるN₈₀のa)増加数濃度及びb)増加率の中央値。エラーバーの下限と上限はそれぞれ第一四分位数と第三四分位数を表す。

富士山では、増加数濃度は他地点に比べて低いが増加率は比較的高くなっている。これは、エアロゾルの総数濃度が低いことが原因であり、同じく総数濃度の低いPallasでも似た結果が得られている。富士山以外の地点を比べるとエアロゾル数濃度が高い低緯度地域(Chacaltaya, Botsalano)では増加数と増加率共に高く、逆に高緯度地域(Hyytiälä, Vavihill)では、増加数と増加率は低くなる。日射量や生物の活動の量が多いほど、NPFによるCCN数濃度の増加は多くなると考えられる。また、Pallasにおける増加率は他地点と比べて高い。Pallasの特徴は極付近の清浄なエアマスの影響を受けやすいことがあげられ、そのエアマスの化学組成、または日照時間などが原因として考えられる。NPFによるCCN数濃度の増加は地域ごとに特徴が違い、ローカルな影響を受けやすいとわかった。

Mode径がNPF発生から80nmまで増加したイベントは観測日数209日のうち7例あった。後方流跡線解析をすると、7例の内2例は明らかなエアマスの変化があった。その二つはそれぞれ成長時間が12時間と16時間と長く、エアマス変化によるmode径の変化である可能性がある。これらを除く5例は、NPF開始から3~14時間かけて80nmまで成長した。図2は、上述の5例の内最も早く成長したイベントの粒径分布のカラープロットである。このイベントは直前に別のNPFが起きていて、既存粒子への凝集効果が高まり早く成長したと考えられる。また、この二つのイベントの間で、粒径分布から計算される粒子の総体積濃度は単調に増加していた。このことから、凝集のほかに凝結も起きていることが分かった。ここで、核生成によって発生したエアロゾル粒子のブラウン運動による凝集を仮定して、凝集方程式を数値的に解いてmode径の変化を計算した⁶⁾。図2の○マーカーは観測したmode径、破線は数値計算で得たmode径を表す。計算したmode径は成長が遅く、凝結による成長と核生成の持続時間を同時に計算する必要があるとわかった。NPFのCCN数濃度寄与を計算するにはエアロゾルの化学組成と過飽和度などの気象条件の決定が必要となる⁷⁾。

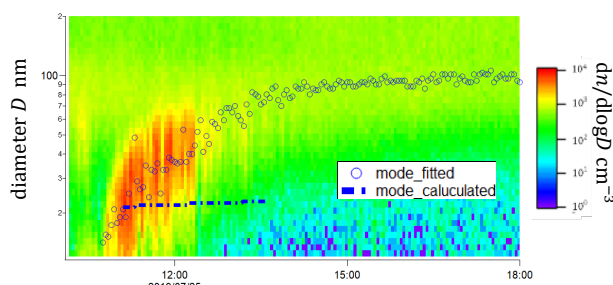


図2 粒径分布カラープロットと凝集方程式を解いた結果

4. まとめ

富士山頂におけるエアロゾル粒子個数粒径分布の観測により、NPFのCCN数濃度への寄与を調べた。NPF前後でN₈₀は富士山では47-234 cm⁻³増加し、その増加率は123-302%だった。この結果は、他の観測点と比較するとエアロゾル数濃度の低い地域に特徴的なものとわかった。また、イベント前後のN₈₀の二時間平均値でCCN数濃度変化をみると113イベント中60イベントでN₈₀は増加した。

一日に複数回NPFが起きた日は凝集の効果によるMode径の速い成長が確認できた。このとき、粒径分布の総体積濃度が単調に増加していることから凝結も起きていることが分かった。また凝集方程式をとりてmode径の変化を予測した結果、計算値は成長が遅く凝結核生成も計算する必要があるとわかった。従って、NPFのCCN数濃度寄与を計算するにはエアロゾルの化学組成と過飽和度などの気象条件の決定が必要となる。

謝辞

本観測は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、科研費基盤研究C(24340017)の助成により行われました。

参考文献

- (1) Asmi, E. et al., Atmos. Chem. Phys., 11, 12959–12972, 2011.
- (2) Komppula, M. et al., J. Geophys. Res.-Atmos., 110, D06204, 2005.
- (3) Roberts, G. C. and Nenes, A., Aerosol Sci. Technol., 39, 206–221, 2005.
- (4) Kerminen, V.-M., et al., Atmos. Chem. Phys., 12, 12037–12059, 2012.
- (5) Rose, C. et al., Atmos. Chem. Phys., 17(2), 1529–1541, 2017
- (6) 三浦和彦, 藤田慎一, 大河内博, 速水洋, 松田和秀, 櫻井達也: 越境大気汚染の物理と化学, 2014
- (7) Jacobson, M. Z., J. Geophys. Res., 107, 4366, <https://doi.org/10.1029/2001JD002044>, 2002.

ちょっと上まで行ってきます ～ドローンで見る太郎坊上空の 대기～ (2020 年度年賀寄附金配分事業)

○皆巳幸也¹, 大河内博², 速水洋², 三浦和彦³, 森樹大³, 加藤俊吾⁴, 和田龍一⁵, 小林拓⁶, 南齋勉⁷

1.石川県立大学, 2.早稲田大学, 3.東京理科大学, 4.東京都立大学,

5.帝京科学大学, 6.山梨大学, 7.静岡理工科大学

1. はじめに

かつて日本国内で見られた公害型と言うべき大気汚染の状況が年を追って改善されてきたのに代わって, 近年は経済成長が著しいアジア大陸からの長距離輸送型大気汚染が懸念されています. 実際に, それに起因すると思われる現象として, 2000 年を過ぎてから北九州や日本海沿岸地域を中心に光化学オキシダント(光化学スモッグ)注意報の発表回数が増えていることや, 微小粒子状物質(いわゆる PM_{2.5})の環境基準超過が挙げられます. 半世紀も前に欧米諸国が経験したような森林衰退や湖沼の酸性化などの自然環境破壊を未然に防止するため, また私たちの生活環境そのものを保全するため, 種々の大気汚染物質が長距離輸送される実態を解明することはきわめて重要です. 特に, 国内の影響を排除した考察を行うには, 自由対流圏に相当する高度にあって近傍の汚染源による影響を受けにくい富士山域での観測が有効です.

そうした動機から, 筆者らは十数年にわたって富士山頂や山麓で越境汚染に起因する酸性雨の状況を明らかにしてきました. 今年度は, 新型コロナウイルスによる感染症の拡大により山頂での夏期観測は断念せざるを得なくなったものの, 山麓に位置する太郎坊での観測を例年よりも充実させること



図1 観測に用いたマルチコプター(ドローン)

により, 従来とは違った形で越境汚染の状況を把握することを目指しました. その一環として, これまでは地上のみだった観測の対象を, 少しだけですが上空まで広げたものとするようになりました.

2. 観測の概要

上空も含めた観測は, 2020 年 12 月 7~9 日の原則として日中に, 富士山麓の太郎坊(標高 1,291m)で行いました. この地点は, 以前から早稲田大学や東京理科大学を中心とした大気化学グループが観測の拠点としているほか, 山頂へ上がるブルドーザの基地にもなっています.

観測には, 図1の写真にあるマルチコプター(いわゆる“ドローン”)を用いました. 一緒に写っているパイロットの背丈と比べていただければ判るとおり, ちょっと大きめの機体です. ここに種々の観測装置を交代で搭載してフライトを行いました.

観測の対象は, 気象条件(風向・風速, 気温, 湿度, 気圧)のほか, 微小粒子状物質(PM_{2.5} ほか), 二酸化窒素(NO₂), オゾン(O₃), 黒色炭素(BC), 揮発性有機化合物(VOC)です. なお, 別の機体を用いて雲粒を採取する観測も同時進行で行いましたが, その詳細は割愛します.

フライトは, 上記の3日間にそれぞれ 4,7,5 回の都合 16 回を行いました. その中で, VOC の採取では樹木の直上や高度 150m で約 10 分間, 他の回は高度 150m まで 30m ごとの 5 高度で約 3 分間ずつホバリング(同じ高度での滞留)を行い, 移行中も含めてフライト中は連続で観測しました.

3. 結果および考察

観測の期間中には, 大陸の高気圧が徐々に日本列島を覆い始める弱い冬型の気圧配置が見られ, 大陸からの輸送も期待(?)できそうな状況でした.

図2(次ページ)に, 観測結果の一例を示します. これは, 7 日(1日め)の 12 時過ぎに測定した NO₂ と O₃ を 1 分間の平均値として高度別で示した結果です. ただし, 各高度における最初のデータは移行中の時間帯も含んでおり, 所定以外の高度における状況も反映されるため示していません.

図の例では, O₃ は高度とともに濃度が高くなる傾向を示すのに対し, NO₂ は 60~120m という特定の高度で高い濃度を示すことが判ります. 前者は, この層内では均一に O₃ が拡がっている(長距離輸送によるもの?)中で地表面への沈着(特に植生への吸収?)による影響も寄与していることが考えられ

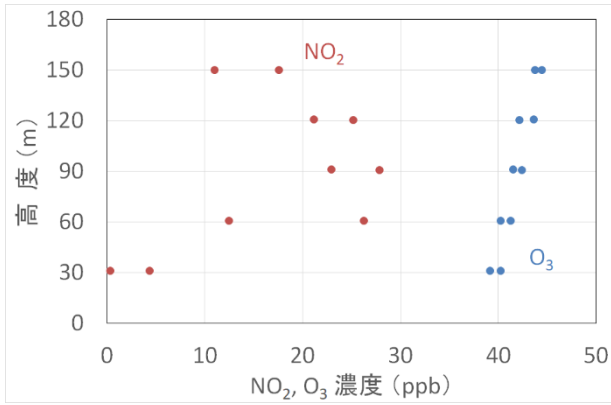


図2 高度別のNO₂, O₃濃度
(2020年12月7日12:16~12:34, 太郎坊)

ます。また後者では、(近隣から?)特定の高度をNO₂が輸送されてきている可能性があります。

4. おわりに

ここで示した結果は一つの例であり、それが常に見られるものではありませんし、いまだ多くのデータが解析の途中です。今後、気象条件や他の測定項目とも突き合わせながら解析を行い、地上とは違った上空の様子を明らかにしていきたいと考えています。

なお、本観測は2020年度の年賀寄附金配分事業により実施されました。採択いただいた日本郵便株式会社に謝意を表します。

富士山麓から放出される植物由来ガス観測をマルチコプターで初挑戦！ :夏季に向けて冬季にチャレンジ

石川翔¹, 大河内博¹, 速水洋¹, 勝見尚也², 皆巳幸也², 竹内政樹³, 戸田敬⁴, 加藤俊吾⁵, 三浦和彦⁶, 小林拓⁷,
和田龍一⁸, 南齋勉⁹, 土器屋由紀子¹⁰, 畠山史郎¹⁰, 山本祐志¹¹, 三阪和弘¹¹

1.早稲田大学,2.石川県立大学,3.徳島大学, 4. 熊本大学, 5.東京都立大学, 6.東京理科大学, 7.山梨大学,8.帝京科学大
学, 9.静岡理工科大学, 10.富士山環境研究センター, 11.グリーンブルー株式会社

1. はじめに

マルチコプターは空撮に広く使われています。大気観測でもマルチコプターが活発に活用されつつありますが、搭載可能重量や電池寿命の問題があり、本格的な大気観測には解決すべき課題が多くあります。一方、近年の小型センサー技術の進展は目覚ましく、PM2.5、オゾンなどの大気汚染物質小型軽量センサーは実用段階にあります。今後、様々な小型軽量センサーの開発とマルチコプターの弱点が克服されれば、高額な航空機を用いたり、高山に登ることなく、大気汚染物質の鉛直分布情報を得ることが可能になります(図1)。

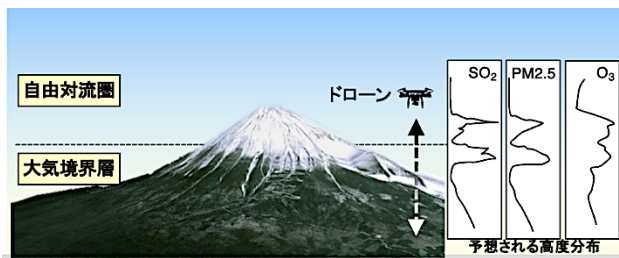


図1 マルチコプターによる大気汚染観測の理想像

2. なぜ富士山麓で鉛直大気観測を行うのか？

富士山麓でマルチコプターによる鉛直大気観測を行う狙いは二つあります。一つは越境大気汚染の実態解明です。富士山頂は夏季観測しか行えませんが、富士山麓であれば通年観測が可能です。北西季節風が卓越する冬季から春季に、マルチコプターで鉛直大気観測を行えば越境輸送の鉛直構造の常時監視ができます。いまは夢物語ですが、富士山麓で定時に複数のマルチコプターを高度毎にホバリングさせて計測することにより、大気境界層上部から自由対流圏下層(富士山頂高度)までの常時監視が可能になります。

もう一つは、山間部豪雨の生成機構の解明です。国内で夏季に記録的短時間大雨が頻発しており、山間部でも豪雨発生頻度が増加しています(米戸ら, 2021)。丹沢や富士山周辺でも南側斜面で豪雨発生頻度が増加しています。夏季の豪雨発生要因として、地球温暖化による海水温度上昇に伴う海洋水蒸気量の増大が指摘されています。一方、山間部で発生する局地豪雨では、森林大気から放出される生物起源揮発性有機化合物(BVOCs)が関与している可能性があります。BVOCsは人為起源揮発性有機化合物(AVOCs)よりも放出量のはるかに多く、オゾンや生物起源二次生成有機エアロゾル

(BSOA)生成に関与することが知られています。オゾンは大気汚染物質の酸化・粒子化を促進しますし、BSOAが雲凝結核として山間部豪雨をもたらす積乱雲の発達に関しているかもしれません。マルチコプターを用いることにより、森林樹冠から放出されるBVOCsの実態を把握し、オゾンおよびBSOAへの生成過程を調べる事が可能になります。

3. 人為・植物起源揮発性有機化合物の鉛直観測に成功

冬季における越境大気汚染観測と森林樹冠直上のBVOCs観測が可能かどうか夏季観測に向けて検証を行いました。図2には、マルチコプターのモミ樹冠直上の観測の様子と、12月9日14時の観測結果を示しています。単環芳香族炭化水素としてベンゼン、有機塩素化合物としてシス-1,2-ジクロロエチレン、針葉樹から放出されるBVOCsとして α -ピネンの鉛直分布です。AVOCsのベンゼン、シス-1,2-ジクロロエチレンは上空ほど濃度低下しましたが、 α -ピネンは樹冠直上で高く、上空で減少しました。冬季にもBVOCsの高度分布観測が可能であり、夏季観測も十分に行えることが分かりました。

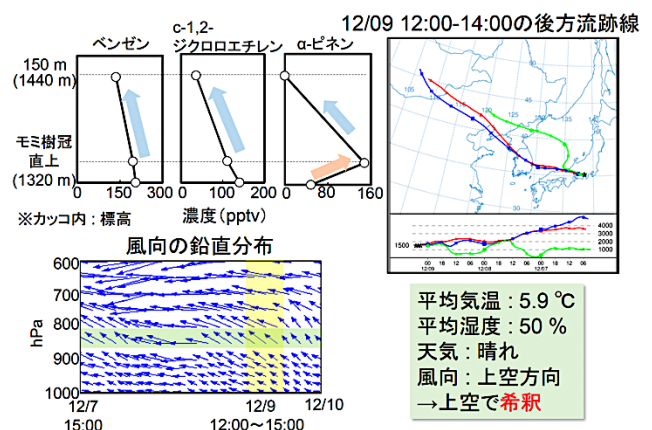


図2 マルチコプターによる揮発性有機化合物の高度分布

2020年富士山太郎坊における窒素酸化物の計測

和田龍一¹, 松田響¹, 定永靖宗², 加藤俊吾³, 大河内博⁴, 森樹大⁵, 三浦和彦⁵, 小林拓⁶, 皆已幸也⁷, 鴨川仁⁸
松本淳⁴, 米村正一郎⁹, 松見豊¹⁰, 梶野瑞王¹¹, 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 NO_x^* 、2015年と2016年に総反応性窒素酸化物(NO_y)、2017年には越境汚染の指標として重要な NO_x 酸化物質(NO_2)の計測を行った。 NO_x や NO_2 濃度を求めるのに必要な NO_2 濃度は一般に化学発光分析法により計測されるが、化学発光分析法では化学干渉があることから正確な NO_2 濃度の計測は難しい。2018年と2019年の観測にて NO_2 を、選択的にLED光を用いてNOに分解し、生成したNOを化学発光分析法にて計測する分析手法を検討し、富士山頂での大気計測に応用した。しかし、その変換効率と安定性は十分でなかった。本観測では光分解コンバータを改良し、富士山中腹に位置する太郎坊観測所においてその性能と富士山太郎坊での窒素酸化物計測の可能性を検証した。

2. 方法

太郎坊観測所にて、2020年8月18日よりNO、 NO_2 、 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 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、太郎坊観測所にて行った。NOと NO_2 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。 NO_2 の光分解効率を、 NO_2 標準ガスを太郎坊観測所にて測定することで求め、 NO_2 計測値の補正に用いた。

3. 結果と考察

標準試料により求めた NO_2 光分解コンバータのNOへの変換効率は2019年に 0.31 ± 0.01 であったのに対し、2020年では 0.616 ± 0.001 と約2倍に向上した。また120日後の変換効率は 0.585 ± 0.001 と若干低下したか安定して高い変換効率を示した。富士山太郎坊のNO、 NO_y 、 NO_2 および NO_2 濃度の9月16日までの1か月間の観測結果を図1に示す。NO、 NO_2 、 NO_y の平均濃度はそれぞれ 0.09 ± 1.55 ppb, 0.87 ± 3.20 ppb, 1.27 ± 2.61 ppb(±の後の数字は標準偏差)であった。富士山頂における2017年8月20日~22日のそれら平均濃度は 0.02 ± 0.01 ppb, 0.11 ± 0.10 ppb, 0.41 ± 0.25 ppbと報告されており(和田ら, 分析化学, 2018)富士山太郎坊のNO、 NO_2 、 NO_y 濃度は富士

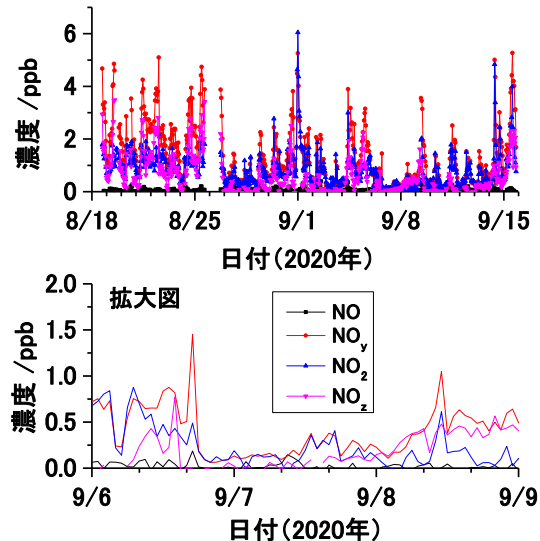


図1. 2020年富士山太郎坊における窒素酸化物濃度。

上) 1か月間の観測結果。下) 濃度が低い期間の拡大図。

山頂にくらべ高く、変動が大きいことが分かった。近隣の御殿場市街地の影響を受けていると考えられた。

しかしながら9月6日0:00-9月9日0:00は窒素酸化物濃度が富士山頂と同程度に低く、また変動も小さかった(NO: 0.01 ± 0.07 ppb, NO_2 : 0.14 ± 0.18 ppb, NO_y : 0.32 ± 0.21 ppb)。9月6日18:00-9月7日11:00にかけて NO_y 濃度は0.1ppbであり、9月8日8:00-22:00にかけて NO_y 濃度は0.4~0.7ppbと相対的に高かった。後方流跡線解析より先の期間は太平洋由来、後の期間は大陸由来の気塊であることが示唆された。上記期間の NO_2 濃度と O_3 濃度の相関をとり近似直線の傾きを求めた。先の期間の傾きは24.5($r=0.15$)であったのに対し、後の期間は9.0($r=0.53$)であった。相関係数は大きくないものの、これら傾きは清浄気塊と汚染気塊の傾きの報告値と類似しており、富士山太郎坊にて遠方から移流した気塊を観測できた可能性がある。通年観測を行い、富士山太郎坊にて越境汚染を調査できるか検証する。

4. まとめ

光分解コンバータを改良検討し、2020年富士山太郎坊での観測に適用した。富士山太郎坊での窒素酸化物濃度は富士山頂に比べて高く、御殿場市街地の影響を受けていることが示唆された。しかしながら、短い期間であるが遠方から移流した気塊を観測できる可能性があることが分かった。

富士山麓太郎坊での CO, O₃, SO₂ の測定

○矢田茂久¹, 加藤俊吾¹, 辰巳紘奨¹, 植山光樹¹, 橋間美弥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)の観測をおこなうことにした。

2. CO, O₃, SO₂ 測定器

太郎坊への測器の設置は 2020 年 8 月 5 日に行い、それ以後大気測定を継続している。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(それぞれ Thermo Environmental Instrument 社, Model48C, Model49C, Model43C)。CO 計, SO₂ 計については定期的にゼロガスを測定してバックグラウンドシグナルの変動を取り除いた。これらは過去に夏季の富士山頂に設置して測定を行っていたものと同じ測器である。

3. 測定結果

夏季について太郎坊で観測された濃度を過去の山頂の測定結果と比較すると、CO は太郎坊が高めであった。御殿場などの都市域の影響を太郎坊のほうが受けやすいため、妥当である。一方、O₃ は太郎坊より山頂のほうが高めとなる逆の傾向がみられた。山頂は植生による O₃ の除去反応をうけにくいこと、O₃ が高濃度の上空の成層圏大気の影響をうけることがあること、などが理由と考えられる。SO₂ については太郎坊においてスパイク的に高濃度となることが多く見られた。

平均日内変動を図に示す。CO については午前と午後やや高濃度となる傾向があり、O₃ については 14 時頃を最大とする午後の高濃度となった。太郎坊が山腹に位置し、山谷風により午後御殿場からの空気の影響を受けているであろうことに一致する結果である。SO₂ については日中に高濃度となった。これも山谷風で説明はできるが、都市大気の影響なら

SO₂ の高濃度は CO の高濃度と同時にみられるはずである。しかし、必ずしも SO₂ 濃度は CO 高濃度と同時にみられておらず、都市大気とは違う発生源、すなわち火山性ガスをとらえているかもしれないと思われた。付近の火山性ガス噴出地点として箱根大涌谷がある。しかし、高濃度が検出されるときと風向の関係、静岡県内の大気汚染観測局のデータ(そらまめくん)との比較では、大涌谷からの火山性ガスの輸送であると説明するには不十分なものであった。

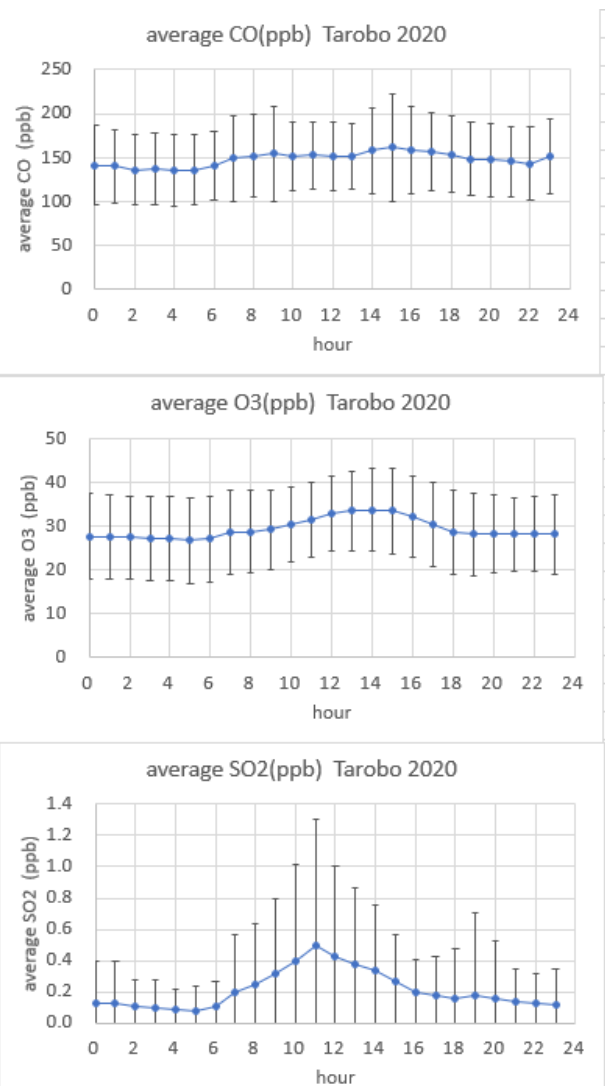


図 太郎坊での O₃, CO, SO₂ の平均日内変動

謝辞: 本研究は新技術振興渡辺記念会, 日本郵政年賀寄付金分配事業の援助を受けて行われました。また、観測関係者に感謝いたします。

富士山麓で夏季豪雨の実態解明にチャレンジ！ :地球温暖化と大気汚染の相乗効果解明を目指して

米戸鈴美香¹, 大河内博¹, 井川学², 岩崎貴也², 戸田敬³, 高橋善幸⁴, 清水英幸⁴,
佐瀬裕之⁵, 村田浩太郎⁶, 藍川昌秀⁷, 家合浩明⁸, 栗林正俊⁹

1.早稲田大学,2.神奈川県立大学,3.熊本大学, 4. 国立環境研究所, 5.アジア大気汚染研究センター,
6.静岡県立大学, 7.北九州市立大学, 8.新潟県保健環境科学研究所, 9.長野県環境保全研究所

1. 日本各地で豪雨発生が増えている。

数年に1回程度しか起こらない、1時間に100 mm前後の猛烈な雨を**記録的短時間大雨**といいます。近年、記録的短時間大雨が多発しており、都市部や住宅街で河川氾濫や内水氾濫(雨量が都市の排水処理能力を超える)により洪水が発生し、山間部で大規模な土砂災害が多発してします。2017年以降、記録的短時間大雨の発令回数が急増しており、2018年に123回、2017年と2020年に109回に達しています。時期としては7月から9月に集中していますが、2020年7月には過去最大の降水量と1時間降水量50mm以上の発生回数を記録しました。同じ場所に数時間わたり降り続く**集中豪雨**の原因として、地球温暖化による海水表面温度の上昇により、大量の暖かい湿った空気が継続的に流入し、**線状降水帯**(雨をもたらす積乱雲が列上に発達)の形成が指摘されていますが、そのメカニズムは解明されていません。

2. 富士山周辺でも豪雨発生頻度が増加

富士山南東麓の赤塚(1280 m)の降雨量解析を行いました(図1)。その結果、2002年以降、富士山南東麓で年間降水量は変わっていませんが、前線の活発化により、時間雨量30 mmを越える豪雨が増えていることが分かりました。2019年は台風性豪雨が多かったことも分かります。

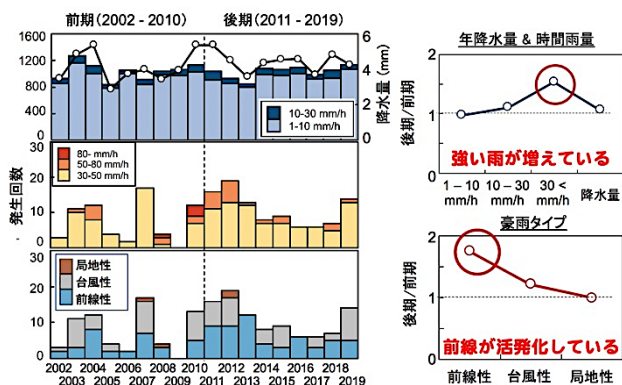


図1 富士山南東麓における降水量と豪雨発生回数

3. 山間部豪雨の生成には森林由来物質が関与？

雨が降るには、雲を作る水蒸気と核(雲凝結核/氷晶核)、上昇気流が必要です。台風性豪雨は海洋で発達しながら陸域に達してどこにでも降ります。一方、山間部で局地的に発達する豪雨では、水蒸気を上昇流させる地形とともに、

森林由来物質が関係している可能性があります(図2)。山間部局地性豪雨は短時間に発達して消滅するので、大規模な土砂災害には至りませんが、ボディブローのように山間部森林生態系に影響を及ぼします。手入れが行き届いていない人工林からなる中山間地では影響が懸念されます。

森林から生物起源揮発性有機化合物(BVOCs)が大量に放出されていますが、これらは化学反応によりオゾンやPM2.5を生成します。オゾンは都市部から山間部に運ばれてきたSO₂やNO_xからPM2.5を生成します。温暖化が進行するとBVOCs放出量は増加し、さらにオゾンやPM2.5が生成することになります。

私たちは、山間部豪雨の生成機構解明を目指して、富士山南東麓でガスやPM2.5とともに豪雨を採取し、豪雨の化学分析から何が豪雨をもたらす核となったのかを調べています。また、豪雨の水素・酸素安定同位体分析を行って、豪雨をもたらす積乱雲の源になる水蒸気がどこから運ばれてきたのかを追跡しています。

発表では2020年8月の局地性豪雨について紹介します。

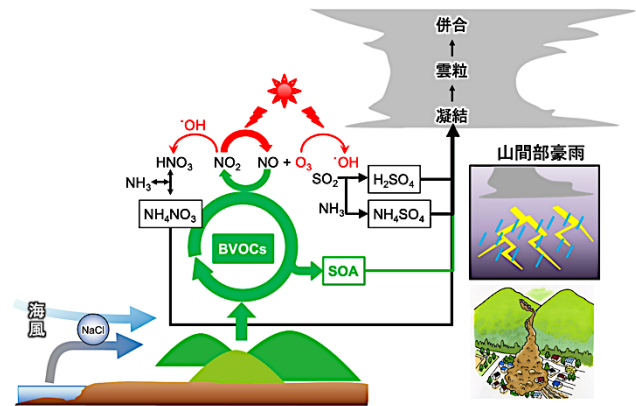


図2 森林が関与する山間部豪雨生成機構の仮説図

4. おわりに

本研究は、文部科学省・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」(代表・大河内博, 課題番号:19H00955), WNI(アジア・太平洋)「Comparative Research of the Effect of Air pollution on the Formation of Heavy Rainfall in the Tropical and Temperate Regions under Global Warming」(代表・大河内博)の研究助成を受けました。深謝申し上げます。

富士山麓で冬季の大気中マイクロプラスチック観測に初挑戦！ ：新規サブミクロン赤外分光法(O-PTIR)の活用

趙鶴立¹, 大河内博¹, 吉田昇永¹, 速水洋¹, 勝見尚也², 皆巳幸也², 竹内政樹³, 小林拓⁴, 加藤俊吾⁵, 三浦和彦⁶, 和田龍一⁷, 南齋勉⁸, 宮崎あかね⁹, 緒方祐子¹⁰, 板谷庸平¹⁰, 小林華栄¹¹, 浦山憲雄¹¹, 新居田恭弘¹², 山本衛¹³
1.早稲田大, 2.石川県立大, 3.徳島大, 4. 山梨大, 5.東京都立大, 6.東京理科大, 7.帝京科学大, 8. 静岡理工科大, 9.日本女子大, 10.柴田科学, 11.日本サーマル・コンサルティング, 12.パーキンエルマー・ジャパン, 13.日本分光

1. はじめに

現代はプラスチックの時代です。プラスチック生産量は1950年以降に急増し、2050年には400億トンに達すると言われています。世界全体で年間800万トンのプラスチックが陸域から河川を通じて海洋に流出しており、海洋生態系の破壊が懸念されています。このため、持続可能な開発目標(SDGs)で海洋プラスチックが取り上げられ、プラスチック使用量削減のために2020年に国内でレジ袋が有料化されました。しかし、新型コロナ禍による在宅学習・勤務に伴ってプラスチック容器ゴミが急増しました。さらに、プラスチック製不織布マスクの月間推定使用枚数が1290億枚にものぼり、不適切管理により新たなプラスチック汚染が広がっています。

一方、大気中に浮遊するマイクロプラスチック(airborne microplastics; AMPs)の存在はこれまで見過ごされてきました。近年、マイクロプラスチックが海洋から大気へ放出され、陸域への年間輸送量は14万トンと推計されています(図1)。反対に、陸域から海洋への輸送経路としても大気は重要です。実際、重金属元素の陸域から海洋への輸送は河川よりも大気が重要であることは知られています。マイクロプラスチックの健康影響や環境影響の解明には大気観測は不可欠です。

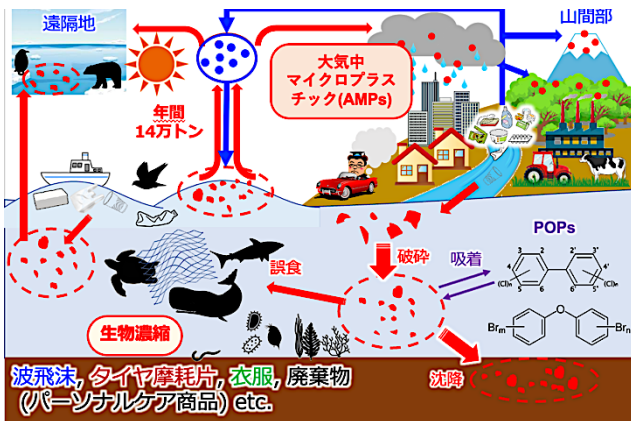


図1 大気中マイクロプラスチックの想定される起源と動態

2. マイクロプラスチックは海洋と大気で何が違うのか？

海洋マイクロプラスチック(marine microplastics; MMPs)とAMPsの違いは主に四つあると考えられます。

一つ目は、大きさです。マイクロプラスチックは5mm以下の微細なプラスチックと言われていますが、ミリメートルレベルの粒子は大気にはほとんど存在しません。一般に、大気中

に浮遊している粒子をエアロゾルといますが、大きさは0.03–100マイクロメートルです。10マイクロメートルより大きい粒子は重力によってすぐに地上へ落下します。

二つ目は、大きさの表し方です。MMPsでは顕微鏡下で計測した実粒径を用いますが、AMPsは空気動力学径で表します。ちなみに、PM2.5も空気動力学径です。粒子は球形、破片状、繊維状、棒状など様々な形状で存在していますので、これを空気中で同じ振る舞いをする単位密度の球形粒子直径で表現します。これが空気動力学径です。

三つ目は、ヒトへの摂取経路です。MMPsでは飲食ですが、AMPsでは呼吸が中心です。微細なAMPsは肺胞まで運ばれます。飲食では糞尿として排出されますが、呼吸で肺胞に侵入すると体外排出は困難であり、長期間体内に蓄積します。

四つ目は、環境影響機構です。プラスチック分解速度は、水中よりも大気中で数十倍速く、分解過程ではメタン、二酸化炭素などの温室効果ガスを放出します。AMPsは雲を作る核となる可能性も指摘されています。プラスチック表面に重金属や有害有機化合物が吸着したり、微生物が表面にバイオフィルムを形成すると、雲を作りやすくなる可能性があります。

3. AMPsの分析は難しい

一般に、プラスチック判別は赤外線の吸収波長(波数)を調べる赤外分光法を用いますが、数マイクロメートル程度までしか判別ができません。これより小さい粒子の判別は顕微ラマン法が用いられます。健康影響の解明にはナノプラスチックの判別も必要になります。

2019年8月に富士山頂で採取したPM2.5を顕微ラマン法(堀場製作所, 日本分光)と顕微FTIR ATRイメージング法(パーキンエルマー・ジャパン)で計測し、ポリプロピレン, シリコン樹脂, アクリル樹脂とともに、生分解性プラスチックであるポリヒドロキシ酪酸が存在していることを明らかにしました。

2020年12月に富士山麓でエアロゾルを粒径別に採取し、サブミクロン(約0.5マイクロメートル)まで計測可能な新規計測法である光熱変換赤外分光法(Optical Photothermal IR Spectroscopy; O-PTIR)を活用してAMPsの計測を行いました。その結果、5マイクロメートル未満のポリエチレンテレフタレート(PET)を判別することができました。現在、解析を進めているところであり、発表時には冬季の富士山麓におけるAMPsの実態と起源についてご報告します。

東京神楽坂および富士山麓で測定した気柱全体のエアロゾルの光学特性・微物理特性

齋藤天真¹, 三浦和彦¹, 森 樹大¹, 桃井裕広², 青木一真³

1.東京理科大学, 2.千葉大学, 3.富山大学

1. はじめに

エアロゾルには太陽光を直接散乱・吸収する直接効果と雲凝結核として雲の寿命や放射特性を変化させる間接効果があり、地球の放射バランスに影響を与えている。しかしこれらの影響力は不確実性が大きく、化学組成や生成過程が様々であること、時間および空間依存性が大きいことなどに起因する (IPCC 2013¹), e.g. 直接効果の放射強制力: $-0.23 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$ 。空間依存性を調べるためには異なる環境での観測が必要であり、本研究では都市部 (東京神楽坂) と山岳部 (富士山麓太郎坊) の 2 地点でスカイラジオメータを用いた放射観測を行い、エアロゾルの光学特性・微物理特性を推定した。

2 観測

東京都新宿区に位置する東京理科大学1号館屋上 (北緯 35.70 度, 東経 139.74 度, 高さ 59.6 m) と、静岡県御殿場市に位置する富士山麓太郎坊 (北緯 35.33 度, 138.80 度, 標高 1290 m) の 2 地点で観測を行なった。神楽坂は交通量の多い幹線道路が傍を通る都市部に位置しており、太郎坊はローカルな汚染が少ないが木に覆われ、また雲ができやすいことから欠測が多い環境となっている。神楽坂では 2014 年から、太郎坊では 2015 年からスカイラジオメータ (POM-02, Prede) を用いた観測を継続的に行なっている。スカイラジオメータにより直達光および散乱光強度を測定し、400, 500, 675, 870, 1020 nm の 5 波長について調べた。

直達光強度 (F) からは、太陽放射の減衰量の指標となるエアロゾルの光学的厚さ (AOT, τ) を、エアロゾル以外の空気分子による Rayleigh 散乱 (τ_{Rayleigh}), オゾンなどの吸収体による光吸収 (τ_{Ozone}) を差し引くことで求めた。ここで地球に散乱体がない場合の直達光強度 (F_0) を XIL 法²⁾により決定した。

$$\tau = \ln(F/F_0)/m_0 - \tau_{\text{Rayleigh}} - \tau_{\text{Ozone}}$$

散乱光強度からは、SKYRAD.pack ver4.2³⁾を用いて、AOT, 気柱積算体積粒径分布を推定した。

3 結果・考察

東京神楽坂において 1993 年から測定された AOT の月平均値を図 1 に示す。1993 年から 2005 年は多目的分光放射計, 2004 年から 2016 年はサンフォトメータ, 2014 年から現在まではスカイラジオメータを用いて観測された。AOT は春から夏に高く、冬に低い季節変化があることが報告されている⁴⁾。現在の観測でも同様の AOT の季節変化

が見られた。また経年変化として、2006 年頃に大きく減少し、現在まで横ばいとなっている様子がわかる。

また同様に気柱積算体積粒径分布から微小モード ($0.05 < r < 0.54 \mu\text{m}$) と粗大モード ($0.54 \leq r < 7.73 \mu\text{m}$) の総体積を算出し、その月平均値を図 2 に示す。微小モードは春から夏に高くなり冬に低い、粗大モードでは春に高くなりそれ以外の時期では低いといった季節変化が見られ、特に微小モードはわずかながら減少傾向が見られた。春季には大陸から黄砂などのダスト粒子が多く飛来、夏季にかけて日射が強くなり光化学反応が生じて微小粒子が生成されやすいことからこのような季節変化が見られたと考えられる。

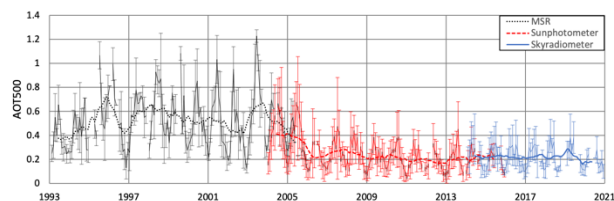


図1 東京神楽坂における AOT(500)の月平均の経年変化 (エラーバーは標準偏差, 各線は 12 ヶ月の移動平均)

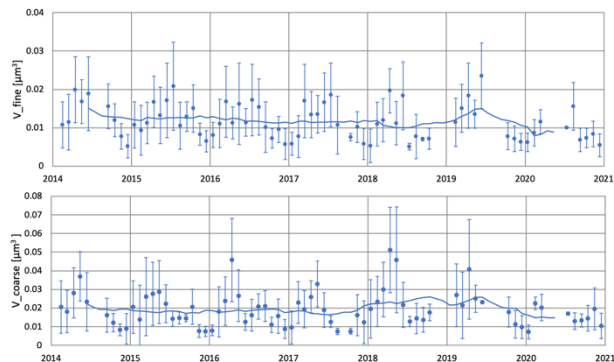


図2 推定された微小モード(上)と粗大モード(下)の総体積 (エラーバーは標準偏差, 各線は 12 ヶ月の移動平均)

富士山麓太郎坊において測定された 2015 年からの AOT と東京神楽坂における同時期の AOT を図 3 に示す。太郎坊の散乱光データは欠測が多く、ここでは直達光データの解析結果から月ごとの平均値、標準偏差を算出し、比較した。太郎坊における AOT は春から夏に高く、冬に低い季節変化があることが報告されている⁵⁾。現在の観測でも同様の AOT の季節変化が見られた。また富士山麓太郎坊における AOT は東京神楽坂に比べ多くの月でおおよそ 1/2 ほどであった。

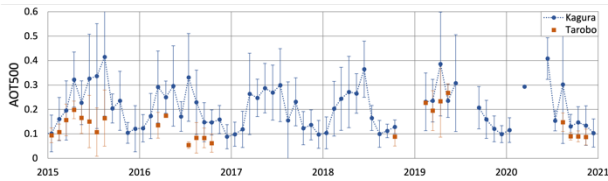


図3 富士山麓太郎坊と東京神楽坂におけるAOT(500)

東京神楽坂と富士山麓太郎坊の両地点で散乱光データの解析を行うことができた2015年5月13日のAOT, 気柱積算体積粒径分布, 風向風速(AMeDAS[®]), ライダー(NIES⁷, 新宿御苑)のデータをそれぞれ図に示す. AOT(図4)は, 神楽坂では午前中に一時的に増加して午後には高い値をとっており, 太郎坊では安定した値から午後に一時的に増加している. 両地点で一時的にAOTが増加した時刻の体積粒径分布(図5)はよく一致していた. 周辺地域全体の風向(図6)とスカイラジオメータの観測の結果より, 神楽坂から太郎坊への同一のエアマスの輸送が考えられる. ライダー(図7)より, このAOTが増加した時刻で粒径の大きい球形粒子が同じく一時的にかなり分布していた様子がわかる. これらのことから, 神楽坂では午前中に一時的に地表付近で大きな球形粒子が多く分布し, 時間が経つにつれ鉛直拡散, そのエアマスが前線の影響と考えられる複雑な風の動きにより太郎坊へ輸送されたと考えられる.

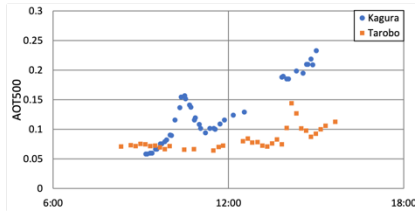


図4 AOT500 [2015/5/13]

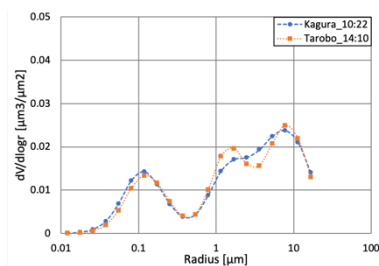


図5 気柱積算体積粒径分布の比較 [2015/5/13]

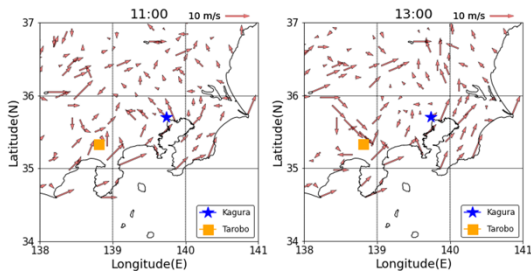


図6 風向風速の水平分布 [2015/5/13]

4 おわりに

条件の異なる2地点でスカイラジオメータを用いた観測を行なった. 東京神楽坂におけるAOTは現在は横ばいとなっている. また微小モードは春から夏に, 粗大モードは春に高くなる季節変化が見られた. 富士山麓太郎坊におけるAOTは東京神楽坂に比べおよそ1/2で, 似た季節変化が見られた. 重複解析日の比較から, 東京神楽坂から富士山麓太郎坊へ, 東から西へのエアマスの輸送が初めて確認された. 今後, 解析プログラムの改良と様々な場所での継続した観測によりエアロゾルの直接効果の正確な評価, 空間依存性の解明が期待できる.

謝辞

本研究の一部は千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究により実施された(2020)

参考

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013): Climate Change 2013 The Physical Scientific Basis
- 2) Nakajima et al. (2020)., An overview of and issues with sky radiometer technology and SKYNET, Atmos. Meas. Tech., 13, 4195–4218
- 3) Nakajima et al. (1996)., Use of Sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, Appl. Opt., 35, 2672–2686
- 4) 中原勇希 (2015)., 東京理科大学 修士論文
- 5) 橋口翔 (2016)., 東京理科大学 卒業論文
- 6) <https://www.jma.go.jp/jp/amedas/>
- 7) <https://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net/>

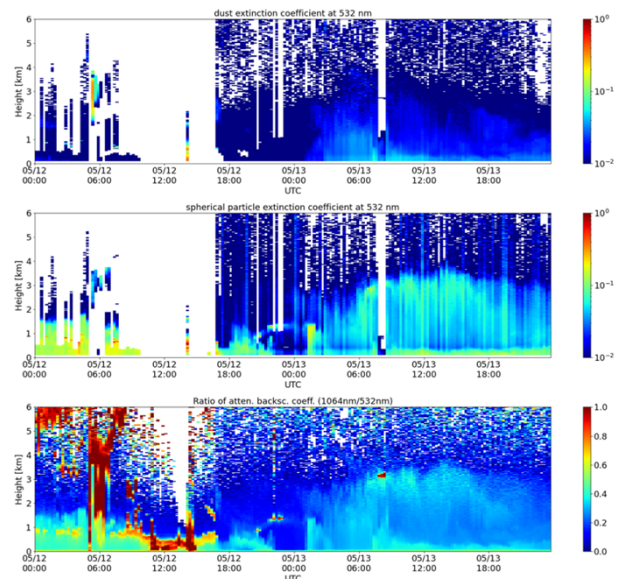


図7 ライダー(新宿御苑) [2015/5/13]

雷雲の中に潜り込める世界最先端の雷研究の地、富士山

鴨川仁¹, 大気電気・雷研究グループ

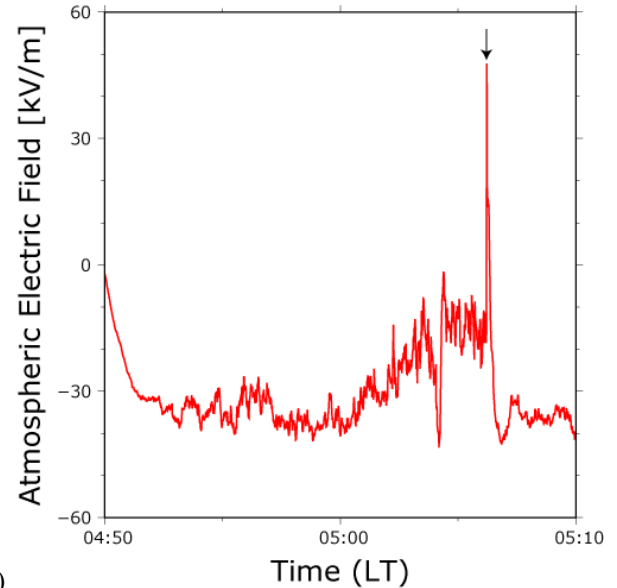
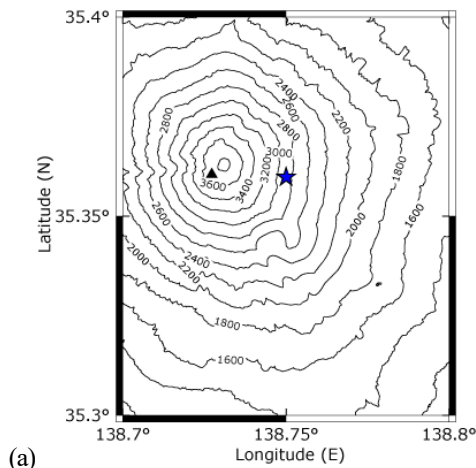
1. 静岡県立大学

1. はじめに

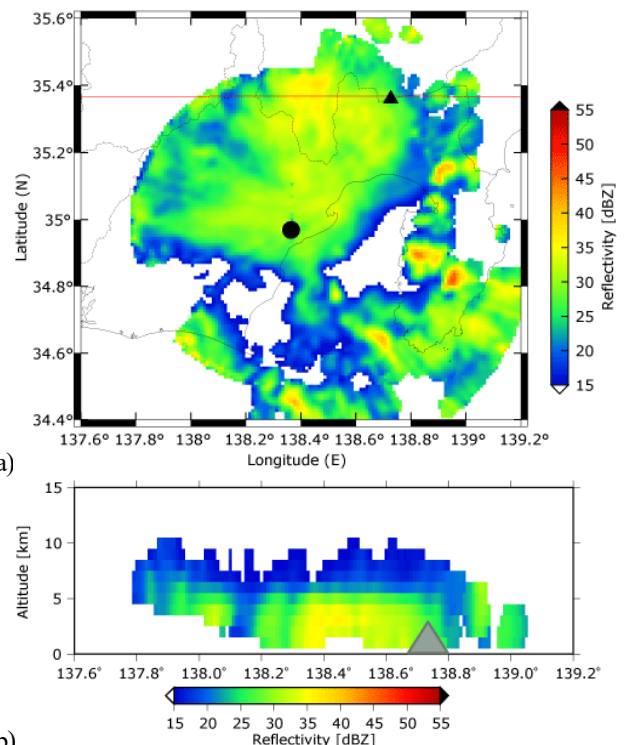
2008年からスタートした富士山山頂での大気電気観測は、宇宙線・放射線観測の補助的な役割として始まったものである。しかし数年の測定の結果、取得されたデータから大気電気研究を進展させる成果も得られた。それゆえ、2012年から大気電気研究は独立したグループとして2019年も観測を行った。コロナ禍ゆえ夏季観測が中止になった2020年も太郎坊・御殿場などを活用し研究活動を続けた。現在では、富士山山頂という高所を活用し雷に関連する諸現象の研究を行っている。近年では以下の4つのテーマを中心に観測研究を行っている。1) 被雷対策具体化のために接地系と部材間の接続状況の調査および富士山山体を測定器とした上向き雷放電の研究、2) 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活動、4) 新型広帯域大気電場測定機器の試験、である。本稿では、以上4つのテーマを成果を紹介するにあたって、過去の成果で成果報告会の報告にて詳しく述べられていないものを中心に紹介をする。

2. 上向き雷放電

富士山のような尖鋭孤立峰では、上向きリーダーの雷放電が発生しやすいと予想される。2015年8月13日午前5時6分の旧富士山測候所の近隣で雷放電が発生した。本研究では、フィールド・ミル(FM)による大気電場測定、ログスキーコイルによる雷サージ電流測定、高精度カメラによる雷映像、NTTドコモ社の雷データなど、多種電磁氣的測定を用いて、雷放電現象について多角的に解析した。その結果から、本事例の雷は夏季の対地雷のほとんどを占める下向きリーダーの負極性落雷ではなく、上向きリーダーの負極性雷放電の可能性があると示唆した。



(b) 図1 (a) 2015/8/13 05:06の雷放電のNTTドコモ提供の放電位置(星). 三角は測候所の位置. (b) 2015/8/13に観測された大気電場. 矢印が雷放電の時刻を示す.



(b) 図2 2015/8/13 午前05:05における富士山周辺の雷雲の反射強度. (a) 高度2 km水平断面, 黒丸はXバンドレーダ基地局, 三角は富士山測候所を示す. (b) レーダーエコーの鉛直断面図. (a)の赤線部分が対象.

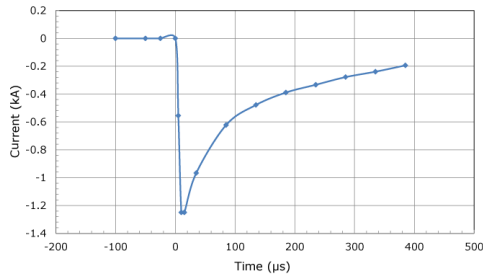


図3 2015/8/13 05:06 雷放電時の接地線測定電流。

落雷は、2015年8月13日午前5時6分に富士山東2kmの地点に負極性対地雷が発生した(図1)。単発の雷放電でいわゆる一発雷とみられる。5時5分の時の、富士山周辺の雷雲の反射強度の水平断面と鉛直断面を図2a, 2bに示す。図2より、この時間における富士山周辺の雷雲はそれほど発達していなかったと考えられる。

図3は落雷時の接地線電流波形である。高压ケーブル内蔵接地線に流れたピーク電流最大値は、約1.25kAであった。富士山測候所の山麓と繋がる接地線は、高压ケーブル内蔵接地線以外にもう一つ並列にあり、これに流れる電流も同じと仮定すれば、約2.5kA流れたと推測される。2014年までの富士山における継続的な観測の結果から、この波形データは、測候所の半径3km圏内の落雷にみられる。

図1bは富士山測候所に設置したFMによって測定した雷放電時刻周辺の大気電場である。図3が観測された時刻と同時刻に大気電場にパルス状の変化が見られた。この大気電場変動は負極性落雷のものにみられる。図1b, 3で考察した落雷地点の富士山からの距離、極性に関しては、図1aに示したNTTドコモの雷データとも整合的な結果を得た。

図4は、富士山測候所に設置した天頂カメラの映像である。本事例の雷放電の放電方向が上向きであったとすると、映像からこの放電は富士山測候所の東約2kmの地点から放電開始し、測候所や北西寄りの雷雲内に放電していったと考えられる。以上の結果から推定される本事例の雷放電のモデル図を図5に示した。

なお、ログスキーコイルを用いた結果は、本成果報告書の安本勝富士山環境研究センター主任研究員の報告をご覧ください。



図4 2015/8/13 05:06 の雷放電時の測候所に設置した天頂カメラの映像。画像上方向が北西。

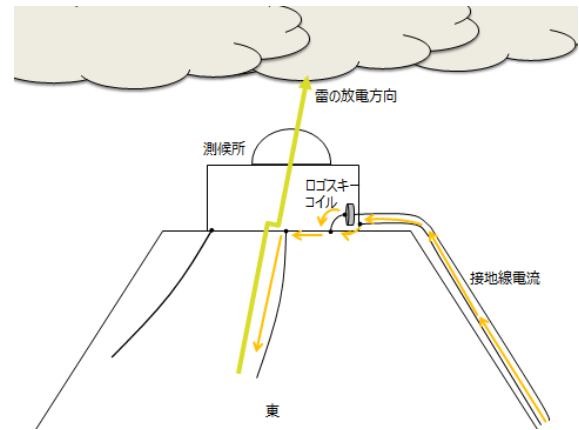


図5 2015/8/13 05:06 の雷放電のモデル図。

3. 雷活動で発生する高エネルギー放射線

雷活動に起因すると考えられる放射線が、冬季雷をはじめ、さらには Terrestrial gamma-ray flash (TGF)と呼ばれる雷雲上空で観測される変動まで様々な時と場所で観測されている。これらの放射線には、雷雲中の高電場に起因すると考えられる10秒以上持続する長時間の放射線変動と、雷放電に起因すると考えられる1ミリ秒程度の短時間の放射線バーストの2つのタイプが観測されている。特に、前者は冬季雷を代表として、放射線発生源と考えられる雷雲と観測地点の距離が短い場所で頻りに観測されている。

冬季雷活動時に地上で観測される事象は、落雷とほぼ同時に観測される短時間バーストの他に、落雷の数10秒程度前から上昇し、落雷発生とともに再び元の値に戻るような、放射線計数率の緩やかな変動が観測されている。しかも、そのエネルギーは数MeVから10MeV超と高エネルギーである。このような事象は、雷雲の高度が高い夏季雷時では地上で観測された報告がない。そのため、雷雲高度の低い冬季雷の場合、放射線の発生源と考えられる雷雲の高電場領域も低い高度で形成され、この領域で加速された高エネルギー電子は空気分子との雪崩的な衝突によって制動放射線(光子)を生成し、その一部が地上まで達したものと考えられる。

そこで、雷雲中では夏季雷でも冬季雷と同様の事象が発生しているかどうかを調べるために、日本で最も高く、また雷活動が盛んな独立峰である富士山の山頂において雷活動時の放射線変動を2008年より観測している。

本放射線観測は、放射線を観測している3つのグループが雷観測チームに参画し、各種大気電気観測と平行して行っている。初期は、鳥居建男福島大学特任教授(当時日本原子力研究開発機構)が参画、以後 David Smith 教授(カリフォルニア大学サンタクルーズ校)、榎戸榎戸輝揚理研チームリーダー(当時、京都大学)の2グループが参画している。

雷雲接近時に計測された放射線についての報告は過去の成果報告会で多数報告されているゆえ、そちらの報告書を参照願いたい。

4. 高高度放電発光現象と雷放電

本成果報告書において鈴木智幸博士による過去の成果の概要が示されているので、詳細はそちらを参照されたい。本稿では概要では紹介されていない画像を紹介したい。2013年8月1日から2日にかけてにTV局(テレビ朝日「奇跡の地球物語」とタイアップし、スプライトの撮影を試みた。Canon 社 EOS を用いて屋外に待機し雷放電が発生しているところに深夜カメラを向け、動画撮影を連続で行った。その結果4回、スプライトのカラー撮影に成功した。カラー画像からは鮮明な赤色であることもはっきりと認識できた(図 6)。このスプライトは富士山から約 500~600 km離れた太平洋上で発達した雷雲の活発な雷放電活動によって発生したものであった(図 7)。2021 年にも同種の人力による機動的観測も計画したい。



図 6 2013/8/2 午前 1:46:48 (JST)に富士山山頂からカラー撮影した高高度放電発光現象(ジャンプコーポレーション撮影)。

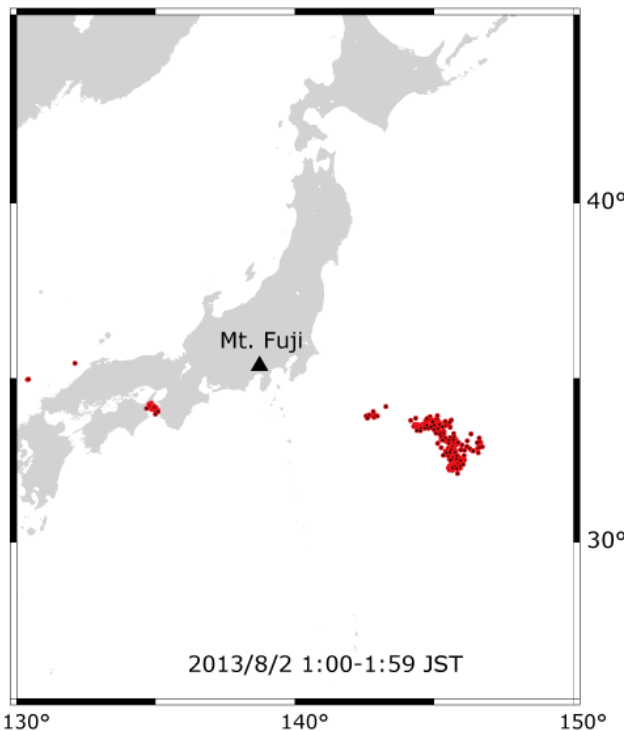


図 7 2013/8/2 午前 1 時台の落雷活動(WWLLN データより)。太平洋上の活発な雷活動が見てとれる。

5. 新型広帯域大気電場測定機器の実証実験

4)については観測機器(音羽電機社製 LATOM)の動作確認を行った(図 8)。本装置はダイナミックレンジが広く、1台の装置で幅広いレンジのデータを取得できる。2019 年の設置では安定した良好なデータが連続かつ無欠測で得られた。



図 8 大気電場測定機器。1号庁舎屋根に設置。設置も簡便に行えることが本測定器の特徴である。

6. 今後の展開

本稿にて、過去の成果を提示したが、2021 年では、次のような観測も行っていきたいと考えている。

1) GoPro などのアクションカメラを用いた機動的観測

2013 年に GoPro を用いて、山頂班委託による機動的観測を行ったところ山頂から落雷活動の高画質動画を得ることができた。定常設置のカメラとは異なり、対象物に向けて容易に撮影できるメリットが機動的観測にはある。2020 年に過去の機動的観測のデータを再検討したところ高高度放電発光現象は取られられなかったものの、様々な雷放電が撮影できたことから(図 9)、本観測手法の有用性が明瞭になった。2021 年には広視野のアクションカメラの導入し、雷放電と高高度放電発光現象が同時に撮影できるようにする。



図 9 2013 年夏季観測における山頂班による GoPro を用いた機動的観測による落雷撮影

2) コロナ放電の動画撮影

山頂勤務者ならばよく知っていることだが、雷雲接近時にはコロナ放電によるノイズを直接耳で聞くことができる。測候所の金属突起部(図 10)、接合部などから放電していると考えられるが、これらの音声のみならず、コロナ放電の映像を取得を目指したいと考える。

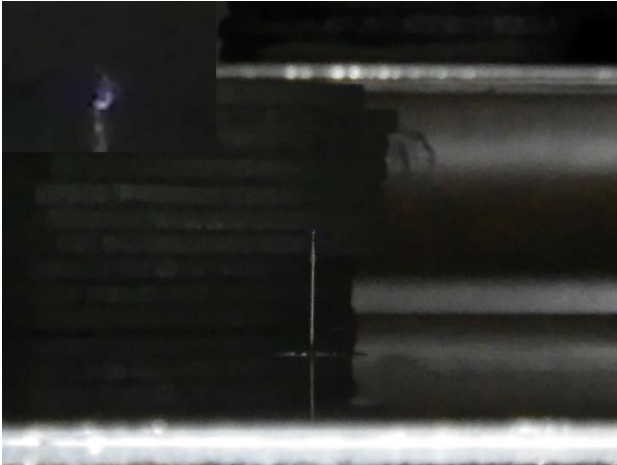


図 10 実験室内でのコロナ放電。強電場下において先端部は放電および発光する。写真は自然界での放電をイメージしやすくするために上下逆さまで表示した。左上に先端部の拡大写真を付けた。

3) Full HD 映像の高高度放電発光現象・雷放電

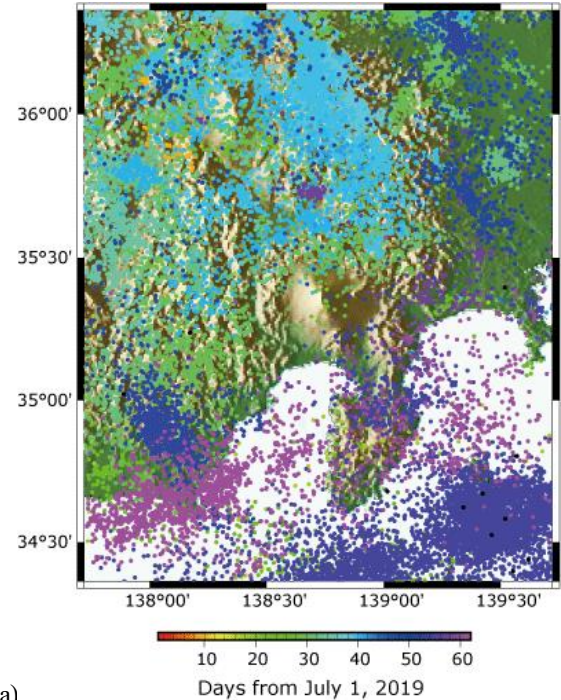
国内一眼レフで高性能として評価が高い、SONY 社の $\alpha 7$ を、2015 年放送文化基金の支援で導入をした。しかしそれ以降、本装置を用いてイベントトリガー式での映像獲得には、山頂という過酷環境のためになかなか成功に至らなかった。2019 年に初めて、装置の正常動作にも成功し雷活動を捉えることができたが(図 11)、高高度放電発光現象を自動撮影するには、装置の記憶容量に限界が生じる問題なども発生した。2021 年は、これらを解決するシステムにしたい。



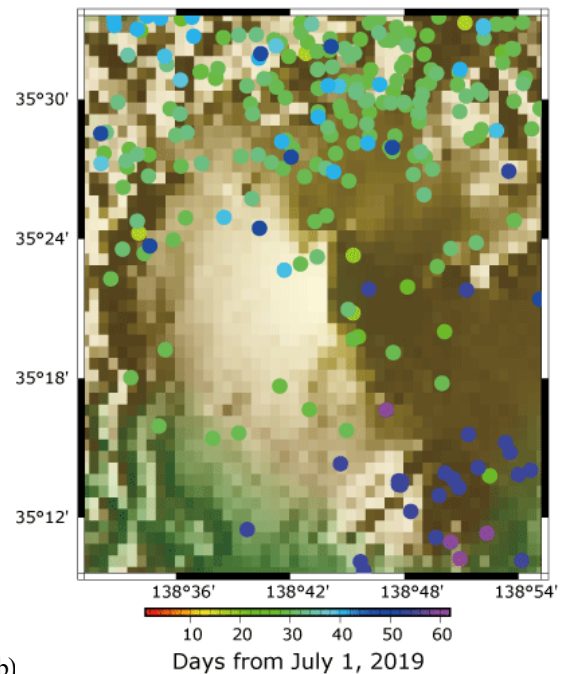
図 11 2019 年8月にイベントトリガ形式で録画された Full HD の雷放電画像。

4) Blitzortung の山頂・越冬(通年)動作

富士山周辺部の落雷位置標定(図 12)の精度を上げるため、現在、富士山周辺に設置している Blitzortung の設置数を増強する。御殿場、太郎坊では通年観測が行っているが、現在山頂では短期的にしか越冬観測が行えていない。ゆえに今後は山頂での通年観測を目指す。この目的にはインターネット回線の確保が重要であり、そのための電力確保が必要となる。



(a)



(b)

図 12 2019 年 7 月 1 日から 8 月 31 日までの富士山周辺部における雷活動。Blitzortung.org にて検知したもの。(a) 富士山周辺を含む図 (b) 富士山山体への落雷。

雷雲と宇宙の間で起こる放電発光, スプライト・エルブスらを 絶景の富士山から観察する

鈴木智幸^{1,2}, 鴨川仁^{1,2}, 長尾年恭²

1. 静岡県立大学, 2. 東海大学

1. はじめに

雷雲が発生させる放電は、落雷や雲放電のみならず、雷雲雲頂より上空でも発生する。これらの放電現象は、雷雲雲頂からほぼ宇宙と言ってもよい電離圏下部の間で発生し、高高度放電発光現象と呼ばれている。高高度放電発光現象は、その発生高度、成因、特徴等によって分類されていて、雷雲雲頂から直接、高度 50km 程度まで達する青い光の光線ブルージェットや高度 25km 程度のブルースターター、雲頂から電離圏まで達する長大な放電である巨大ジェット、非常に大きな電荷を中和する正極性落雷に伴い中間圏で発生し、多種多様な形状を持つスプライト、電離圏下部でドーナツ状に広がるエルブスなどに分類されている。これらの雷雲雲頂から上空で発生する放電現象をターゲットに、孤立峰で、標高が高く、空気が澄んだ、絶景の富士山から行われた高感度カメラによる光学観測によって、2012 年からこれまで撮影された高高度放電発光現象とその親雷雲内で起こる放電発光について、その観測結果について報告する。

2. 観測結果

光学観測は、WATEC 社の高感度モノクロカメラ(モノクロ VGA・640x480 ピクセル)に広角レンズ(4mm)をつけて、ほぼ毎年同じ 2 方向(視野中心北北東及び北東)に向け、旧富

士山測候所北側に設置している。カメラの視野は、東北地方～関東北部～千葉県沖をカバーしている。

図 1 は、2014 年に撮影された高高度放電発光現象と落雷の帰還雷撃が雲頂を飛び出す様子をとらえた画像である。特に 2014/8/6 は、約 1 時間以内に多くの種類の高高度放電発光現象が観測されたほか、短い時間間隔で 2 事例の巨大ジェットが観測された。また、2014/8/18 には、落雷の帰還雷撃が雷雲雲頂を突き抜ける様子が見られた。2 つの巨大ジェットには、雲頂から飛び出した放電が二股に分かれているという特徴があった。

また、図 2 は 2015 年に撮影された雷放電の時系列である。2015/8/6 には「青天の霹靂」と言える、降水のない層状雲下で発生した落雷がとらえられた。同様の放電が 1 秒以内に 2 回発生し、発生する一コマ前では共通して、画面がフラッシュオーバーするほどの雲の激しい発光が見られた。また、2015/8/9 の事例(図 3)では、山岳部で放電を繰り返す孤立積乱雲がはっきりととらえられた。

図 4 は、2013/7/22 に発生した 2 つのスプライトの時系列である。スプライトは、1 フィールド(33.3ms)以下の雷放電発光に伴い発生する事例と、非常に長い(数百 ms 以上)雷放電発光に伴って発生している事例があった。

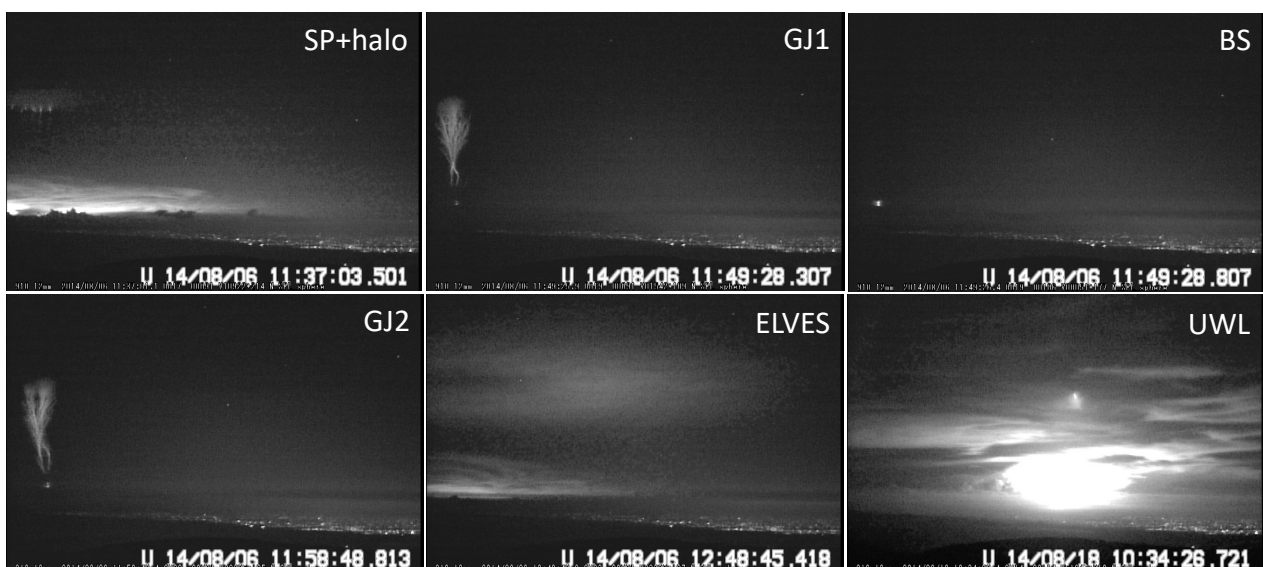


図 1 富士山山頂から観測された 2014/8/6 の高高度放電発光現象と 2014/8/18 の雷放電

SP : スプライト, halo : ヘイロー, GJ1, 2 : 巨大ジェット, ELVES : エルブス, UWL : 雷雲雲頂から飛び出した放電



図2 2015/8/6に発生した層状雲からの落雷と1秒以内に発生した雷放電に伴う雲の発光の時系列



図3 2015/8/9に山岳部で発生した孤立積乱雲の雷放電に伴う雲の発光



図4 2013/7/22に発生したスプライトを発生させた雷放電にともなう雲の発光とスプライト

a) 短い雲の雷放電発光に伴い発生したスプライト、b) 長い雷放電発光に伴い発生したスプライト

3. まとめ

これまでの観測では、地上観測からは難しい、雷雲を横から俯瞰できるという富士山頂特有の立地によって、高高度放電発光現象と雷雲内の雷放電発光が同時に観測されるとともに、関東の山岳部で発達する孤立雷雲の雲放電状況もはっきりと画像に納めることができていることが示された。次年

度は、カラーフル HD(2K)画像で、高高度放電発光現象の詳細な姿に迫りたい。

謝辞：本成果の一部は、東海大学海洋研究所研究事業「富士山火山噴火予測・減災のための観測的研究」(課題番号 2019-01)にも用いられる。

富士山雷観測によるリーダの進展モデル

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 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

富士山測候所の電源は、図 1 に示すように高圧ケーブルを山麓から引込み、測候所と山麓接地極を繋ぐ接地線が併設されている。高圧ケーブルの内蔵接地線も測候所と山麓を繋いでいる。筆者らはこの測候所から山麓側接地極に繋がる接地線の電流測定による雷現象観測を行っている。ここではことわりが無い限り、負極性雷を扱い、接地線電流方向は山麓側を正とする。接地線の電流は、高圧ケーブル内蔵接地線の電流測定を行い校正値との積により全接地線電流を求めている。高圧ケーブル内蔵接地線電流測定は 2012 年より実施しており、測定系は改良を重ね現在に至っている。2017 年

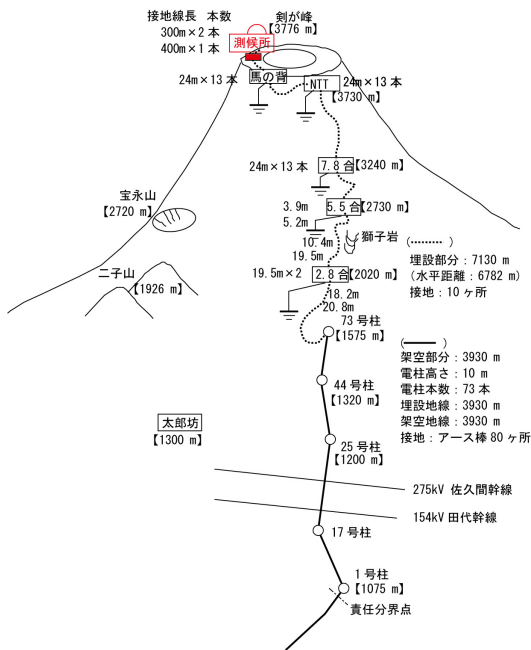


図 1 測候所接地線電流測定箇所 (), 埋設高圧ケーブル・接地線, 及び接地箇所

にトリガーはオフセットの影響を受けないように AC 結合を導入することで雷現象の高感度で安定な測定を可能にしている。本観測系は、複数の雷現象による接地線電流を同時に測定することが可能になっている。電磁誘導と静電誘導による接地線電流からリーダ進展の様子を知ることができ、本報告はこれがどのような進展モデルにした場合に反映されることになるのか考察を試みた。

2. 観測できる雷現象

今迄の観測から、観測できる雷現象による接地線電流は、図2に示すように、対地雷では(1)測候所直撃雷電流、(2)測

候所電極捕集電流、(3)山麓側落雷による逆流電流、さらに(4)雷放電路電流との電磁結合による電流、及び(5)雷雲による測候所誘導電荷量変化による静電誘導電流があることが分かっている。

測候所周辺の雷現象による接地線電流は、一般的に対地雷、電磁誘導、及び静電誘導の3現象による接地線電流が重

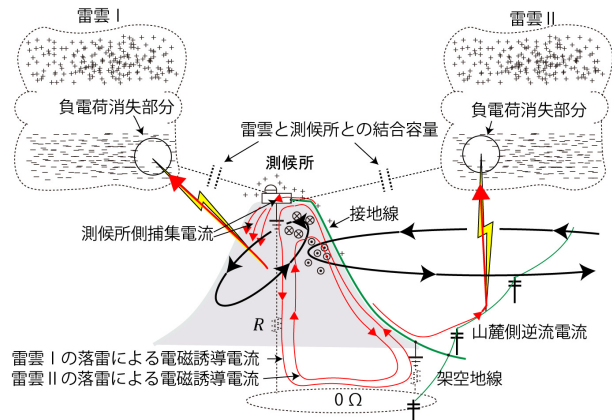


図 2 接地線に電流を流す雷現象 (負極性雷)

畳し観測される。また対地電流が流れない雲放電は電磁結合と静電誘導が重畳した接地線電流が観測される。本報告のステップリーダも雲放電と同様に電磁結合と静電誘導による接地線電流が観測される。近似的に、静電誘導は距離の2乗に反比例し、電磁誘導は距離に反比例する。そのため、遠方雷については対地雷の接地線電流の影響は無くなり、また静電誘導雷による接地線電流は急激に小さくなり、電磁誘導による接地線電流のみが観測されるようになる。測候所周辺の対地雷では対地雷電流に加えて、静電誘導電流と電磁誘導電流が一般的に同時に観測される。雷雲中の小放電は電磁誘導電流による接地線電流のみで電流持続時間によるパルス幅は小さい。

3. 接地線電流の測定方法

測候所と山麓を繋ぐ接地線は複数ある。その中で接地線電流の測定は確実に測候所と山麓を繋いでいることが分かっている図3の 6.6 kV 高圧ケーブル内蔵接地線に流れる電流を測定している。高圧ケーブルに電源電流が流れても零相電流が流れない理想的な条件であれば、測候所と山麓間の接地線に雷現象により流れる電流に電源電流の影響は無く、雷現象により流れる電流のみが観測できる。接地線電流測定は図 4 に示すログウスキーコイル電流計を用いている。高圧ケーブル内蔵接地線電流測定は高圧ケーブルを 2 分割ログウス

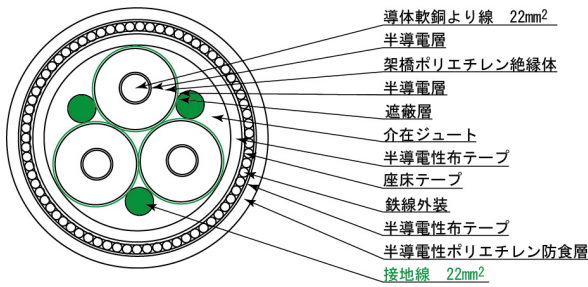


図3 富士山測候所引込高压ケーブルの構成
架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル

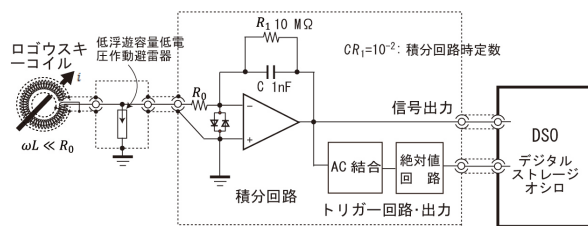


図4 高压ケーブル内接地線電流測定用ログウスキーコイル電流計の基本回路

キーコイルで挿み測定できるようにしている。接地線電流は併設接地線にも流れるため、高压ケーブル内蔵接地線に流れる電流に校正値を掛けることで全接地線電流を求めている。

トリガーは、信号の絶対値を取ることで正負いずれの極性の信号に対しても動作するように絶対値を取り、オフセット電圧の影響を受けないように AC 結合を採用し、安定な接地線電流測定を可能にしている。

雷現象による測定時間は、①対地雷(リターンストローク)、②上向き雷前兆現象、③ステップリーダと続くリターンストローク、④遠方雷リターンストローク・ステップリーダに適切な測定時間になるようにしている。

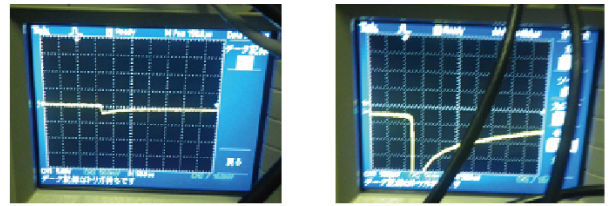
電流測定は、大電流用と小電流用の二つのログウスキーコイルを用い、それぞれに対応する現象で観測される電流を桁の単位で高分解能が得られるように設定し測定している。

4. 観測結果よるリーダの進展モデル

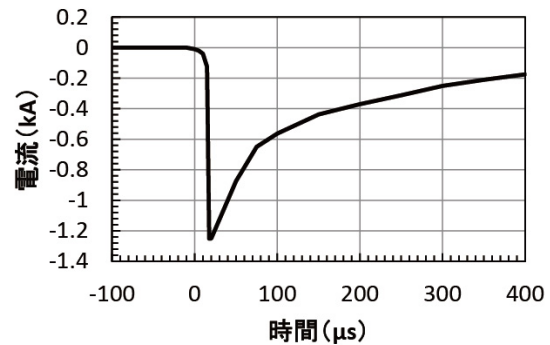
4.1 上向きリーダ

図5は2015年8月13日直撃雷が観測された。2012年より観測を開始して毎年夏期の約2ヶ月の観測期間で初めて観測された直撃雷である。この時に接地線電流に図6の前兆現象が観測された。

測候所のレーダドームがまだ活躍していた時に測候所にいた方の話として、避雷針を高くすることで被雷頻度は多くなることを聞いている。このことは落雷点が広範囲になる下向き雷による被雷ではなく、雷雲の高電界によって測候所の観測塔や避雷針にリーダが発生する上向き雷が多く生じていたの



2.5kA/div., 50µs/div. 0.25kA/div., 50µs/div.
(a) DSOによる観測波形



(b) DSO 観測波形からの再現波形

図5 2015年8月13日5時6分落雷による高压ケーブル内接地線観測電流

ではないかと推測している。

下向き直撃雷の場合、ステップリーダの進展範囲に測候所が入ることが必要になるが、リーダが測候所に近づかないと成立しにくく可能性としては小さく推測している。

上向き雷は大きな電荷量の雷雲により測候所の観測塔、または避雷針等の高電界発生個所にリーダが発生し、それが避雷針効果で伸びリターンストロークになったと推測される。

図6が図5の直撃雷の前兆現象として観測された接地線電流である。初期の部分①では電流は負方向で不安定な変動を伴い増加し、②から③、④と電流は連続的に負方向に大きく増加している。この急激な増加は直撃雷の立ち上がり部分のエッジが取れ丸くなっていることにも現れている。この前兆現象は、500 µs の測定時間で、測定は14秒台で3回、15秒台で1回記録された。前兆現象は、測定の都度 USB メモリーに記録される時間を考慮すると、最大で1秒を超えている。

観測結果から上向き雷のリーダの進展は連続的であり、約1秒持続することが示されたことになる。上向き雷の発生は測候所が山麓側接地極と接続し、測候所の電位は山麓電位であり電荷補給が山麓側から連続的になされるため発生し易いと考えられる。

もし、測候所で無く、十分な電荷補給が期待できない山体の場合、上向きリーダは進展できず、山体への落雷は下向き雷に限られるのではないかと推測している。

図7の⑤も上向き雷と考えられ観測された負の電流パルスはステップリーダによるもので、対向する上向きリーダに正の誘導電荷増加量が接地線電流積分値の負電荷により示さ

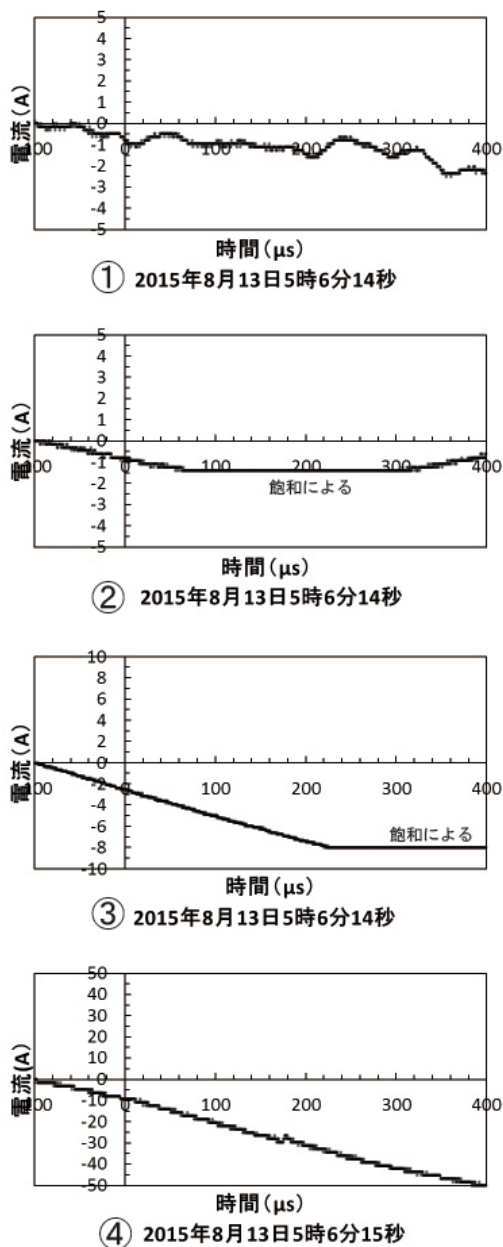


図6 2015年8月13日5時6分に観測された落雷初期の接地線電流

れている。リターンストロークまでの観測はされていないが、回合前の測候所直撃雷の上向きリーダとステップリーダ進展による測定例である。

4.2 ステップリーダ

図7に示す観測例の測定時間は、小さいため、全て前兆現象のみで終わっている。リターンストロークまでは測定できていない。この観測結果と他の観測結果も合わせ、ステップリーダモデルは以下のように考えている。

(1) ステップリーダの進展方向

図7の⑤以外の観測波形は全て鎖交磁束変換線より東にあり、接地線電流の先行パルス極性は正である。接地線電流

積分値のパルス終了後の値は立ち上がり前とほぼ同じであり、雷放電路電流の電磁誘導によるものであることが分かる。

図7の⑤の観測波形は鎖交磁束変換線より西側で観測されたステップリーダである。電流パルスの先行極性は負方向を示している。

図7の全ての観測結果の先行パルスの極性は同一と考えてよく、ステップリーダ放電路電流は同一方向に流れることを示し、同一方向への進展を示している。

図7の①～④、⑥の接地線電流の積分値の各パルス幅時間はステップリーダ電流が流れていることを示し、ステップリーダが進展している時間になる。パルス間の時間帯は休止時間で周囲の電荷をステップリーダ放電路に集めている時間になる。

ステップリーダの進展時の測定結果は、一般的に測候所から見た雷雲負電荷を減少させ、そのため測候所の誘導正電荷を減少させ、正の接地線電流を流すことを示している。⑤は測候所直撃雷でステップリーダと測候所からの上向きリーダが回合する前のリーダ電流による接地線電流とその積分値である。それぞれのリーダは対向するため、上向きリーダ先端にはおおきな正の誘導電荷が生じることを示している。

(2) ステップリーダに見られる休止と進展

放電路は導体と考えてよく雷雲中の電荷を放電路に集電し放電進行方向放電路端に大きな電界を作り、放電を進展させる。この進展で電荷密度が低下し放電路端電界低下を伴い放電を維持できなくなり進展は停止する。絶縁破壊を生じる電界であることが必要である。リーダ放電路に絶縁破壊を可能にする一定以上の電荷が集まると再度放電を開始する。リーダ進展に該当する測定電流積分値パルス幅、及び集電時間に該当するパルスとパルスのゼロ区間は、 $100\ \mu\text{s}$ ～ $300\ \mu\text{s}$ 、及び集電停止時間は $50\ \mu\text{s}$ である。これは既に報告されていることとほぼ合致する。

(3) リーダ放電路への集電機構

本観測系は、電磁誘導に対し高感度のため、短時間放電で終わる多数の小放電が観測された。この時に多数の短放電路が発生しそれらが再結合で消滅する前にさらに合体し、電荷を集め大きな放電路に成長すると考えられる。

多数の小放電路が激しい気流変化等によりほうきの穂先のように集まりほうきの柄のようにステップリーダ放電路に発展していくものと推測される。この現象には一端の放電路が伸びる方向に負電荷が集まりもう一端には正電荷を帯び、そこに雷雲中の激しい気流変化も加わりほうきの穂先が形成されるものと推測される。

激しい気流変化により放電路が変化することで放電路周囲の電荷を集めるスイープ効果、放電進展端の反対側に周囲の電荷を集める多くの放電分岐路が生じることにより主放電路に電荷を集めると推測される。

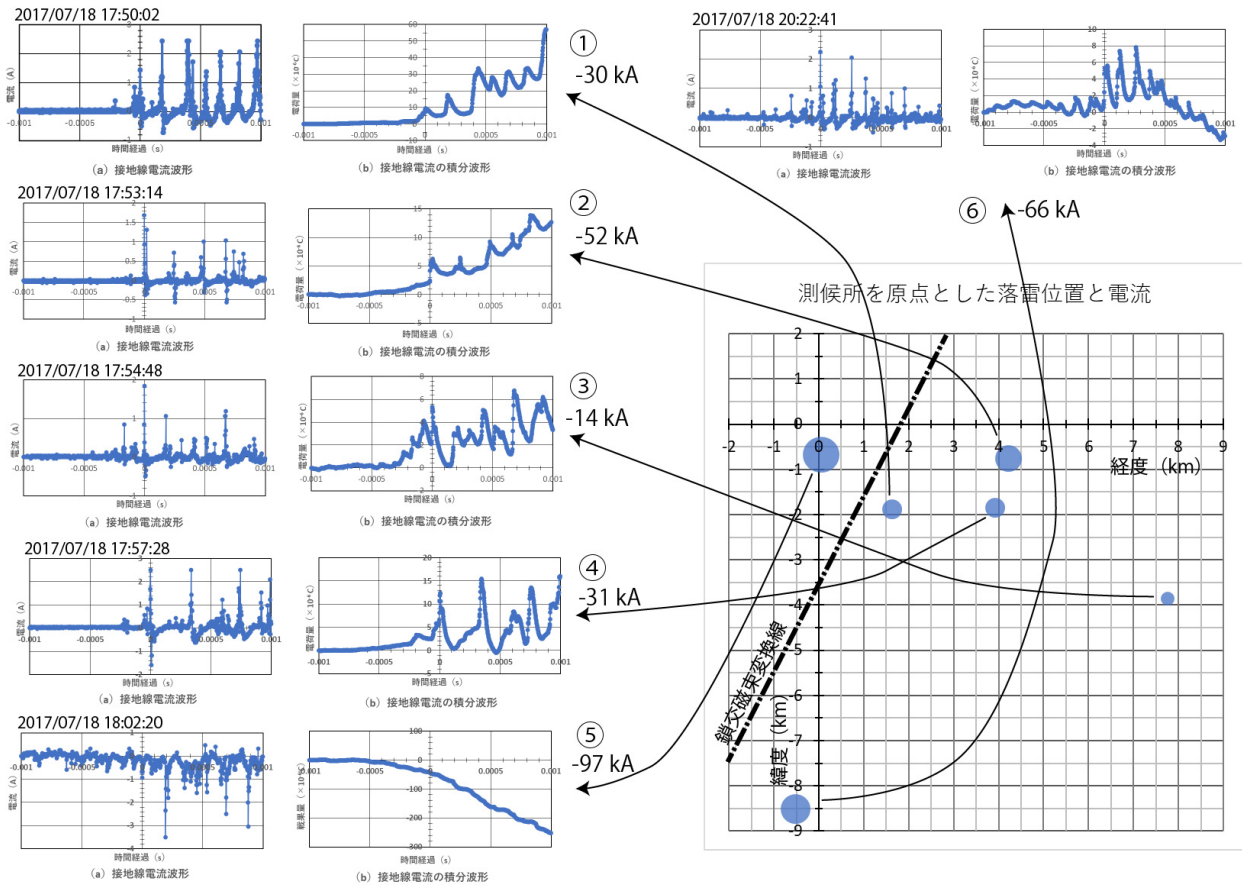


図7 ステップリーダによる接地線電流・同積分値と落雷位置・電流

4.3 ダートリーダ

一旦放電が終わるが、放電路は再結合して完全に消滅する前にトリガーになるダートリーダの初期放電で電荷を集めリーダ放電を開始する。

二重雷の観測結果では一つ目と二つ目のリターンストローク間は 28 ms で、二つ目のダートリーダの初期放電は約 2 ms 手前に生じていた。26 ms の間に気流と静電力で雷雲中の電荷が集められ種になる初期放電がダートリーダの引金となって一気にリーダが対地に放電しリターンストロークになったと考えられる。

5. おわりに

雷現象により富士山体表面の既存接地線に電流が流れる。接地線電流は雷現象を反映して異なる流れ方をするため、複数同時現象であってもそれぞれを分離し、各現象の影響を知ることが可能である。

このように富士山雷観測では複数の雷現象を同時に観測できるという現象解明に有力な情報が得られる雷観測測定系になっている。本報告ではリーダに着目して、以下の進展モデルについて考察した。

(1) 上向きリーダ 富士山測候所では測候所が山麓電位であり、接地線で電荷補給がされるため上向きリーダの発

生条件を満たす条件があることが推測される。上向き雷のリーダの成長は、測候所上空の高密度負電荷により測候所に高電界が生じることで始まり長い前兆現象時間(約 1 s)になると考えられる。

(2) ステップリーダ ステップリーダは同一方向に進展する様子が測定により明らかになった。もう一方は周囲の電荷を集めリーダ放電路先端に電荷を補給する役目を果たしている。ステップリーダの進展は、雷雲負電荷密度を低下させ、測候所の正の誘導電荷は減少する。

(3) ダートリーダ 先行するリターンストローク放電路が再結合により完全に消滅するまえに雷雲の電荷を集め大きな電位勾配の放電路で放電すると考えられる。

今後、観測をさらに進め、落雷情報と合わせてより明快な進展モデルの構築を図りたい。

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山頂班の岩崎洋班長、及び班員の方々、中山良夫 他同 NPO 事務局員の各氏、測候所電気主任の大胡田智寿氏、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、本研究は新技術振興渡辺記念会の受託研究費及び(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」の研究費が用いられている。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.

富士山の噴火予測観測を NPO レベルで目指す

～静岡県では初の全磁力観測～

長尾年恭¹, 佐柳敬造¹, 鴨川仁²

1. 東海大学海洋研究所地震予知・火山津波研究部門,
2. 静岡県立大学グローバル地域センター地震予知部門

1. はじめに

富士山が極めて若い火山であり(人間で言えば 20 歳程度), 火山学者のコンセンサスとして近い将来噴火すると考えられている. 富士山の直近の噴火は 1707 年の宝永の爆発的噴火であり, その後 300 年以上に渡って沈黙している. 次の噴火の発生地点, その様式や規模を予測する事は科学的な観点だけでなく, 首都圏の防災にとっても極めて大きな意義を持つ. このような事から, 次の富士山噴火を精度良く予測するためにも, 多角的な監視が必要であり, 平常時のデータを蓄積しておく事が“異常”を判断するためにも肝要である.

本研究では現在, 富士山において手薄と考えられる地磁気観測の増強をまず行う事とした. 地磁気観測により理論的に確立されているマグマの上昇による全磁力の変化(高温のマグマが山体内部を上昇する事による周囲の岩石の熱消磁)を捉えようというものである.

□ 東大地震研 ◇ 国土地理院

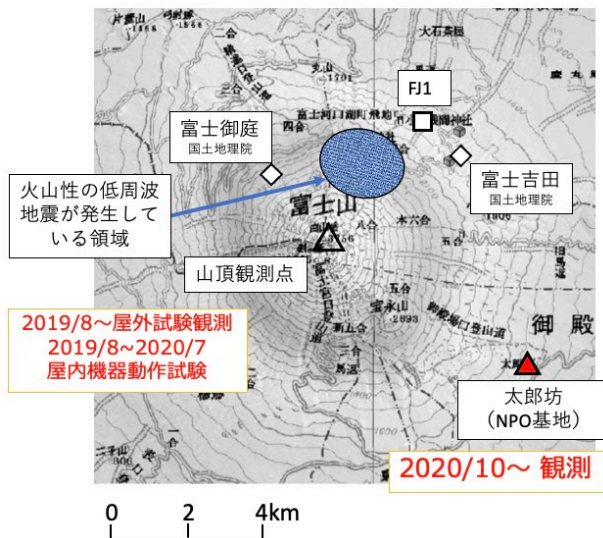


図1 富士山における全磁力観測点の分布

岩石磁化は温度上昇に伴い減少するため, 地表に磁力計を設置してその時間変化を観測することで, 地下の温度変化が間接的に推定できる. これまで阿蘇中岳火口近傍やニュージーランドの White Island など, 多くの火山での全磁力観測により, 地磁気が火山活動に伴い数か月～数年の単位で増減を繰り返すことが報告されている.

3. 観測および初期結果

図1は, 2021 年 1 月時点の地磁気観測点の分布である. 2000 年以降, 国土地理院が2点, 東大地震研が1点を5合目より下で観測を行っており, それより上部には地磁気観測点は存在していなかった.

そこで我々は 2019 年 8 月に山頂にて屋外試験観測として約 1 日間全磁力測定を行い, 東大地震研および国土地理院によって取得されたデータとの比較を行い, 観測記録の精度を評価した. 本屋外観測後, 旧富士山測候所屋内にて越冬観測として SONY 社の ELTRES を含めたシステムの動作確認・耐久試験を 2020 年 7 月までに行い, システム動作の確認を行った.

次に, 我々は, 2020年度においては, 夏季観測事業中止のため山頂に機器設置ができなかったため, 太郎坊にて通年観測を行うことにした. 磁力計設置は 2020 年 10 月に実施された. 図2は太郎坊へのセンサーの設置風景である.



図2 2020 年 10 月に行われた設置作業.

図 3 は設置後初期5日間の全磁力観測値である. ここでは東京大学地震研究所の FJ1 観測点のデータと比較を行った. 太陽活動に起因する日変化をいずれの観測点も明瞭に記録している事が見て取れる.

図 4 はこれらのデータを使い, 東大地震研(FJ1)を横軸に, 太郎坊を縦軸にプロットしたリサージュ図形である. 相関が極

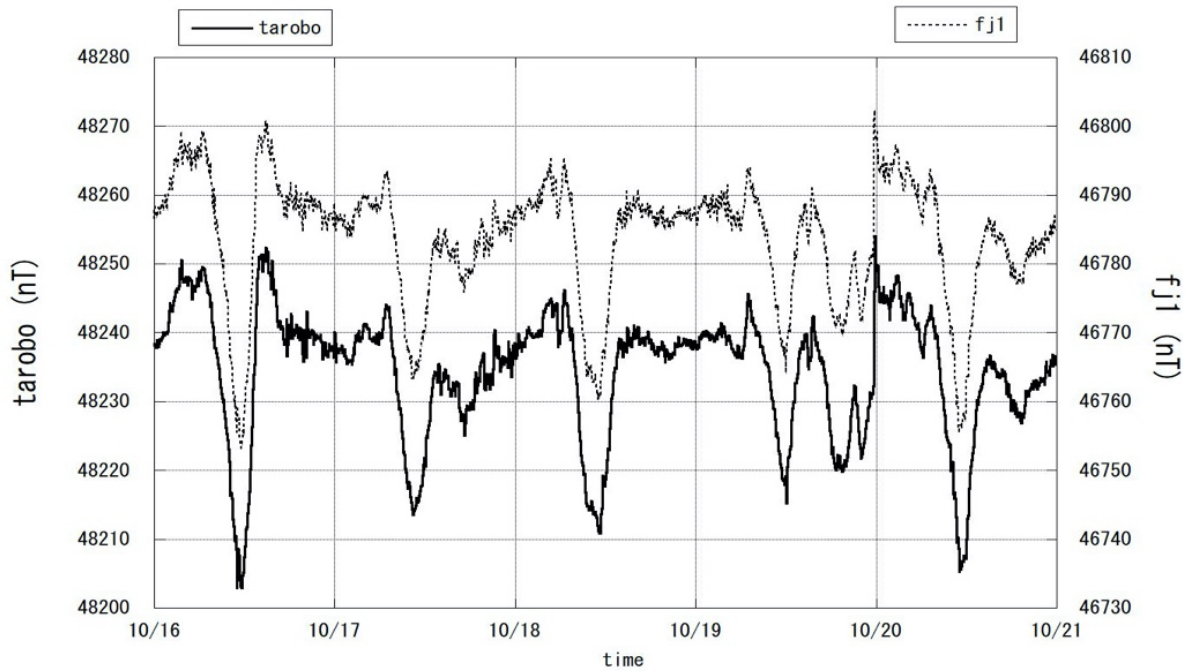


図3 太郎坊と東大地震研 (FJ1) 観測点との比較

めて高い事が見て取れる。

太郎坊に設置した機器は、携帯電話によるインターネット回線を用いてリモートコントロールできる状況になっているが、今後の山頂などにおける低消費電力・長距離データ転送のために SONY の ELTRES の運用も行った。図5に2021年2月のデータ転送された計測状況を示す。

4. 今後の展望

2021年には、今回の太郎坊の機器に加え、もう1台のオーバーハウザー全磁力観測装置を山頂に設置し、通年観測を行う予定である。

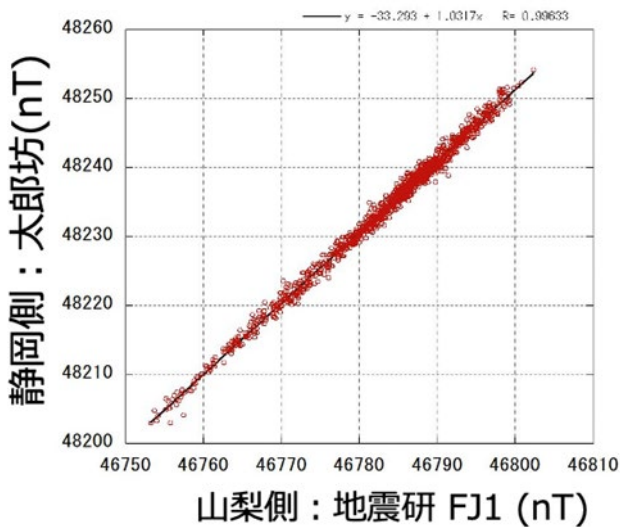


図4 太郎坊とFJ1 のリサージュ図形

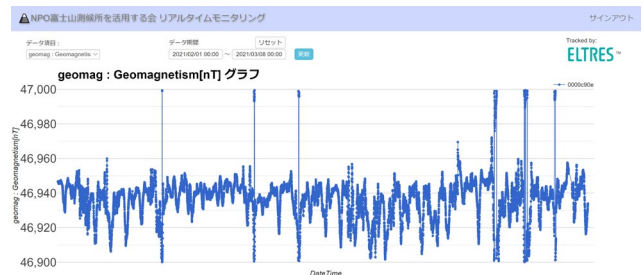


図5 ELTRES によってデータ転送された全磁力データ。

謝辞：機器設置においてはテラテクニカ社およびNYジオフィールド社のご支援を頂いた。本研究は WNI 気象文化創造センター第10回気象文化大賞「超低消費電力長距離通信 LPWA を用いた地磁気観測による富士山噴火予測研究」、公益社団法人ふじのくに地域・大学コンソーシアム「富士山噴火予測を目的とした省電力型地磁気観測の通年実証実験」、東京大学地震研究所・地震・火山噴火の解明と予測に関する公募研究「富士山における全磁力通年観測」および東海大学海洋研究所・個別プロジェクト研究「東南海地方の地震・津波・火山災害の被害最小化に向けた研究」の支援を受けて実施された。東京大学地震研究所全磁力データは、東京大学地震研究所共同利用(共同研究利用コード 2020-D-07)によるものである。国土地理院からも全磁力データの提供を受けた。ELTRES の使用に関して、2018年 SONY・ELTRES チームの協力を得ている。ここに感謝いたします。

富士山頂で火山ガス越冬モニタリング：富士山噴火に備える

○加藤俊吾¹, 高橋智樹¹, 鴨川仁², 土器屋由紀子³, 荒島謙治⁴, 西出葵嘉⁴, 尾花文一⁴

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, 4 ソニーセミコンダクタソリューションズ

1. はじめに

高度 3776m の富士山頂において遠方から長距離輸送される汚染大気塊を捉えるのに適している。そのため、これまで夏季の富士山頂において、二酸化硫黄 (SO₂) などの大気汚染物質の観測を行ってきた。SO₂ は主に石炭燃焼から放出されるが、この数年の夏季の富士山頂の観測から、石炭燃焼由来ではなく国内の火山活動により放出される火山性ガスが検出される事例が多数みられた。また、富士山自体も火山であり、近年の平穏な状況からいつ活発な状態になってもおかしくない。そのため、富士山頂において火山性ガスである SO₂ 濃度が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、消費電力も大きいため、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 (SO₂) センサーを用いて富士山頂でのリアルタイム通年観測 (越冬観測) を実現することを目指した。

2. 省電力の SO₂ センサー

SO₂ を低濃度まで精密に測定するのは紫外発光法を原理とする SO₂ 計 (Thermo Environmental Instrument, Model43C) を用いていたが、消費電力が多く商用電源がない夏季以外は山頂で測定できない。そのため、SO₂ の越冬観測には小電力で操作する Alphasense 社の電気化学ガスセンサー (SO₂-B4) を用いた。SO₂ センサーの性能評価のため、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 SO₂ 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 SO₂ の変動の測定は不十分であることが分かった。

3. 実大気での SO₂ の検出 (大涌谷での観測)

実際の大気での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 SO₂ 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 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確認できた。富士山頂において噴火の影響をとらえる用途には使用できることが分かった。

4. 富士山頂での越冬観測 (2018 年 8 月～2019 年 7 月)

防災の用途には、SO₂ の観測値をリアルタイムで把握できる必要がある。2018 年夏の富士山頂の測候所の閉所前に、越冬テスト用の測器を設置してテスト観測を行った。携帯電話

の電波を利用して通信を行うデータ転送機器 (HALKA, X-Ability 社) および SO₂ センサーに複数個のバッテリーを並列に接続し電源供給した。観測開始後は予定通りの動作をし、リアルタイムで山頂の SO₂ センサーの出力値を受け取ることができた。しかし、数日で通信が途絶えてしまった。おそらく、HALKA を設置した場所での携帯電話の電波の通信状況が悪化してしまったことが原因でないかと予想される。

同時に通信機能のないデータロガー (OM-CP-IFC200, Omega 社) でも測定データを記録しており、2019 年 7 月に越冬したロガーを回収した。越冬中の SO₂ センサーの出力を確認したところ、正常に測定し続けていたことが確認できた。これより、通信方法さえ改善すれば越冬観測をできることが分かった。

5. 富士山頂での ELTRES を用いた越冬観測 (2019 年夏～)

ELTRES は SONY が開発した低消費電力長距離通信 (LPWA) であり、2018 年の閉所から山頂にて室内の気象データの越冬リアルタイム測定に成功をしていた (第 12 回 NPO 成果報告会)。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 センサーに加えて火山ガスより詳細な情報を得られる硫化水素 (H₂S) センサーの測定値も ELTRES でデータ転送するシステムを設置した。リアルタイム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た。冬季の間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測定データを転送している。2020 年夏は富士山頂でのメンテナンス作業が不可能であったが、このシステムで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。

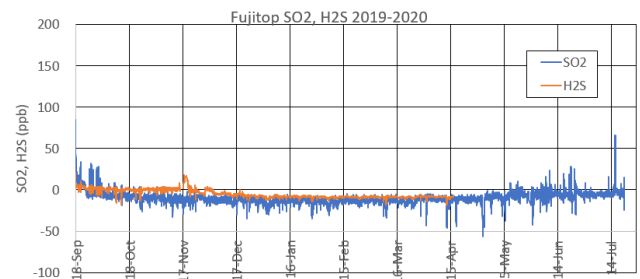


図 山頂越冬観測の SO₂, H₂S データ (2019/9～2020/7)

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た。山頂での観測関係者に感謝いたします。



第 14 回成果報告会講演予稿集

2021 年 3 月 28 日発行



〒102-0083 東京都千代田区麹町 1-6-9 DIK 麹町ビル 901
TEL : 03-3265-8287 FAX : 03-3265-8297
E-mail : tyo-ofc@npofuji3776.org