

第16回成果報告会

2007年 - 2022年 富士山測候所で行った活動の成果

講演予稿集



期日：2023年3月18日（土）13:00～18:00

会場：中野サンプラザ会議室、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

2022年度日本郵便年賀寄付金助成事業

第16回成果報告会

講演予稿集

2023年3月18日(土)

中野サンプラザ会議室、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

2022年度日本郵便年賀寄付金助成事業

ご挨拶

2020年から始まった新型コロナウイルス感染症で、富士山測候所を活用した研究活動も大きな制約を受けてきましたが、2022年は学術研究以外の活用も含めて25件のプロジェクトが感染拡大防止対策の下に実施されました。

標高3,776mの富士山測候所は、観測研究のフィールドとしては極めて特殊な環境です。約2ヶ月間にわたり利用され、無事に終えることができたのは、事務局や山頂班の皆さんをはじめ、NPOの多くのスタッフや研究者の献身的な尽力とバックアップの賜です。心より感謝申し上げます。

富士山はこれまでも様々な研究活動の場として活用されてきました。近年、気候変動の顕在化や自然災害のリスクへの懸念が高まるなか、現象の解明や未然防止は社会のニーズとしても重要になっており、富士山を活かした研究活動はこれらにも貢献しうるものと思います。

本成果報告会は2021年、2022年はオンライン限定で行いでしたが、今回初めて会場での対面とオンラインのハイブリッド方式で開催することとなりました。富士山をフィールドとした研究活動が今後もサステナブルであるためにも、本成果報告会で活発な意見交換が行われることを願っています。

最後になりますが、本成果報告会の開催に向けてご支援、ご協力を頂きました皆様に御礼申し上げます。



第16回成果報告会 実行委員長
米持 真一(埼玉県環境科学国際センター)

第16回成果報告会 プログラム

実行委員長： 米持 真一(埼玉県環境科学国際センター)

副実行委員長： 三木 健司(京都大学)、皆巳幸也(NPO理事・石川県立大学)

□ 13:00～

■ 開会挨拶： 米持真一 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

□ 13:10～14:15

■ 第一部「大気を調べる」

※ No. 数字：会場発表 丸数字：Zoomによる発表

No.	タイトル	著者氏名(所属)
1	富士山の気象・2022年夏	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)
2	富士山は観測タワー！ ～富士山頂および山麓太郎坊でのCO ₂ ,O ₃ ,SO ₂ 観測～	加藤俊吾, 矢田茂久, 布袋愛斗夢(東京都立大学), 大河内博(早稲田大学), 三浦和彦(研究センター), 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)
3	富士山太郎坊における越境汚染の 通年観測手法の開発検討	佐藤颯人, 和田龍一(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, 松本淳, 速水洋(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), 鴨川仁(静岡県立大学), 皆巳幸也(石川県立大学), 松見豊(名古屋大学), 梶野瑞王(気象研究所), 米村正一郎(県立広島大学), 畠山史郎(アジア大気汚染研究センター)
4	富士山頂の昼・夜別PM ₁ の成分と 大陸からの影響	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), Ki-Ho Lee(Jeju National University, Korea)
5	富士山頂でPM _{2.5} , 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), 新居田恭弘(パーキンエルマージャパン), 皆巳幸也, 勝見尚也(石川県立大学), 竹内政樹(徳島大学), 加藤俊吾(東京都立大学), 和田龍一(帝京科学大学), 鴨川仁(静岡県立大学), 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)

休憩(10分)

□ 14:25～15:30

■ 第二部「気候変動と雲の研究」

⑥	新たなCO ₂ 検出部を用いた富士山頂での大気中CO ₂ 濃度観測	野村渉平, 寺尾有希夫, 向井人史(国立環境研究所)
7	富士山測候所庁舎内でのCO ₂ 濃度変動の測定に向けた試験について	前田源次郎(秋田大学工学部通信教育講座受講生)
8	気温を下げるエアロゾルは減っているか	三浦和彦(東京理科大学・研究センター), 平野至心(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), 森樹大(慶應義塾大), 矢吹正教(京都大学), 青木一真(富山大学), 鴨川仁(静岡県立大学)
9	雲の中の氷の種を探す -富士山頂での氷晶核観測2022	村田浩太郎, 米持真一(埼玉県環境科学国際センター), 大河内博(早稲田大学), 鴨川仁(静岡県立大学)
10	ドローン採取による雲滴分析 ～個々の雲滴から雲の情報を知る～	南齋勉, 神谷祐翔(静岡理工科大学), 山本祐志(グリーンブルー(株)), 大河内博(早稲田大学)

休憩(10分)

□ 15:40～15:45

■ 書籍紹介

佐々木一哉(弘前大学)	『富士山測候所のはなし-日本一高い所にある研究施設』 成山堂書店 佐々木一哉・片山葉子・松田千夏・土器屋由紀子 共編著
-------------	--

※ 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

□ 15:45～16:37

■ 第三部「雷を調べる」

※ No. 数字：会場発表 丸数字：Zoomによる発表

No.	タイトル	著者氏名(所属)
11	富士山における大気電気・雷研究：2022年夏期の成果	鴨川仁(静岡県立大学), 大気電気・雷研究チーム
⑫	富士山頂の雷測定で見える雷現象	安本勝, 土器屋由紀子(研究センター), 鴨川仁, 鈴木智幸(静岡県立大学), 佐々木一哉(弘前大学), 村田浩太郎(埼玉県環境科学国際センター)
⑬	富士山で観測された地球ガンマ線フラッシュ	David M. Smith, J. Ortberg(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), J. Chaffin(Air Force Institute of Technology), 王道洪, Ting Wu(岐阜大学)
⑭	2022年富士山山頂から観測された高高度放電発光現象	鈴木智幸, 鴨川仁(静岡県立大学)

休憩(10分)

□ 16:47～17:52

■ 第四部「防災に役立てる」

15	富士山噴火に備えよ！ ～小型センサーによる火山ガスモニタリング～	布袋愛斗夢, 矢田茂久, 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)
⑯	富士山における全磁力観測 -山頂近傍における電磁環境予備調査-	長尾年恭(静岡県立大学グローバル地域センター・東海大学海洋研究所・研究センター), 鴨川仁(静岡県立大学), 上嶋 誠(東京大学地震研究所), 佐柳敬造(東海大学海洋研究所)
⑰	富士山直下の低周波地震の研究 -異常を見逃さない火山活動の監視拡充に向けて-	楠城一嘉(静岡県立大学・静岡大学・統計数理研究所), 行竹洋平(東京大学), 熊澤貴雄(統計数理研究所)
⑱	日本一高い！景色を一望できる タイムラプスビューアー！	村田健史, 村上雄樹, 菊田和孝, 長妻努, 東海林淳二, 川鍋友宏, 山本和憲(情報通信研究機構), 鴨川仁(静岡県立大学), 深沢圭一郎(京都大学), 小林一樹(信州大学), 水原隆道((株)クリアリンクテクノロジー), 金野太一((株)IoTコンサルティング)
⑲	2022年度までの富士山頂教育用 高精密ドーム映像制作プロジェクトについて	宮下敦(成蹊大学), 鴨川仁(静岡県立大学), 尾久土正己(和歌山大学), 中山文恵(和歌山大学)

□ 17:52～

■ 閉会挨拶：三木健司 副実行委員長

■ 誌上発表

旧富士山測候所におけるライブカメラ実証実験	鴨川仁(静岡県立大学), 趙泰勇(株式会社 Cho&Company), 林真彦(NPO)
-----------------------	--

※ 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

富士山の気象・2022年夏

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

2022年夏の時点で、富士山頂では気温や日照時間など一部の項目については気象庁による(無人での)観測が継続されています。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「当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城が昨年とは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、当NPOの事業を知っていただくと共に、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、と思います。

2. 平地は暑かった2022年夏

表1は、東日本の太平洋側における2022年7月と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。大まかな傾向としては、7月上旬を代表として気温が高く、中でも7月1日はAMeDASの235地点で猛暑日となりました。また、7月・8月とも中旬を中心に大雨が降り、線状降水帯への注目が高まりました。

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。100mmを超えることが2回あり、それぞれ大気的不安定によるものと寒冷前線の通過によるものでした。台風は8号が8月13日にすぐ近くを通過し、総量としては約150mmが前日から当日にかけて降りました。ただ、前年のような日降水量が300mmを超える大雨はみられませんでした。

表1. 東日本の太平洋側における2022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	台風・低気圧・気圧の谷 猛暑	前線・低気圧 大気不安定	大気不安定	前線 太平洋 高気圧	低気圧・前線・ 湿った空気 →大雨	低気圧 →大雨 前線
気温	かなり高い	平年並み	高い	高い	平年並み	平年並み
降水量	平年並み	かなり多い	平年並み	平年並み	かなり多い	平年並み
日照時間	平年並み	少ない	多い	平年並み	少ない	少ない

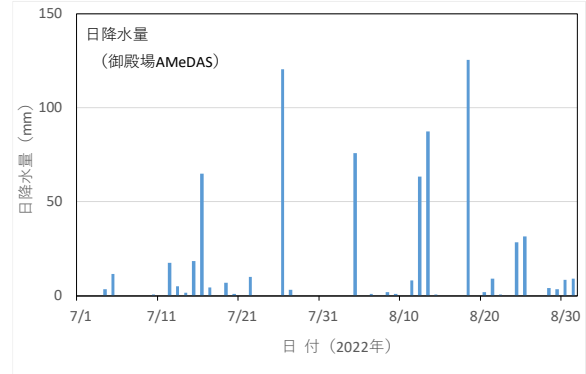


図1. 御殿場AMeDASの日降水量(2022年7～8月)

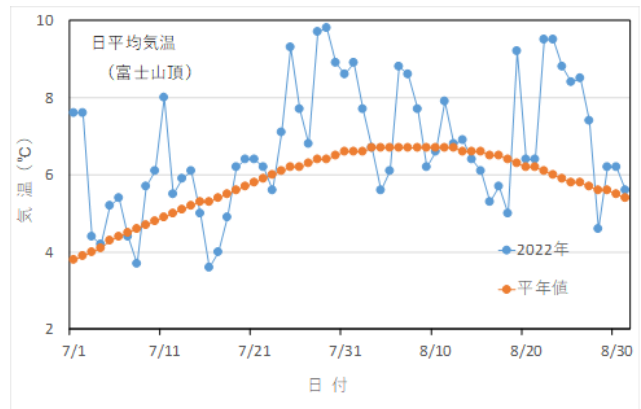


図2. 富士山頂での日平均気温(2022年7～8月)

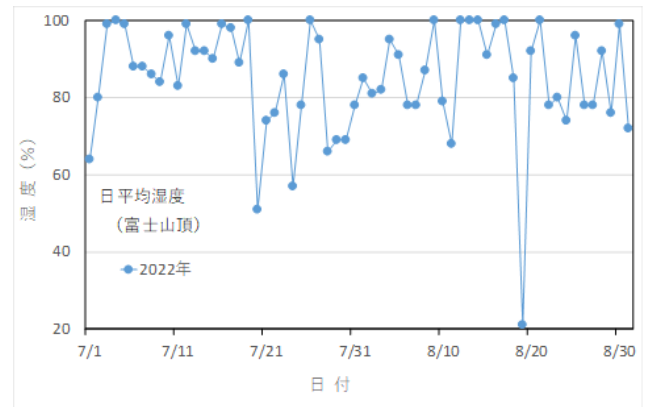


図3. 富士山頂での日平均湿度(2022年7～8月)

3. 思わぬ強風が吹いた山頂

山頂では、気象庁が気圧、気温、露点温度、水蒸気圧、湿度、日照時間を通年で観測しています。その結果のうち、ここでは2022年7月・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。

やはり気温は山頂でも高く、平年値を上回る日が多くなりました。また湿度は概ね60%を超えていましたが、8月19日だけは20%という極端な低さとなりました。気象場としては前日に寒冷前線が通過していますので、大気上層からの下降による乾燥が反映されているのかも知れません。

当NPOでは、7月・8月の限定ですが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、期間内で最も風速が大きかった7月19日(未明に34.0m/s)および前日の風向と風速を1分値の推移として表したものです。左側の縦軸が風向で、北を0°として東回りの角度で表示しています。

この強風は、意外に思われるかも知れませんが台風によるものではありませんでした。当日の天気図を見ると(温帯)低気圧が日本海の南部を通過しており、富士山は温暖前線の南側に位置していました。

また、この図では風向が基本的には西寄りであったことが示されているものの、一時的に風が弱まり、風向が正反対の東寄りとなっていたことも見てとれます。これが実際の状況を示しているのか検証も必要ですが、極めて局地的な現象が起きている可能性も考えられます。



図4. 気象測器の設置風景

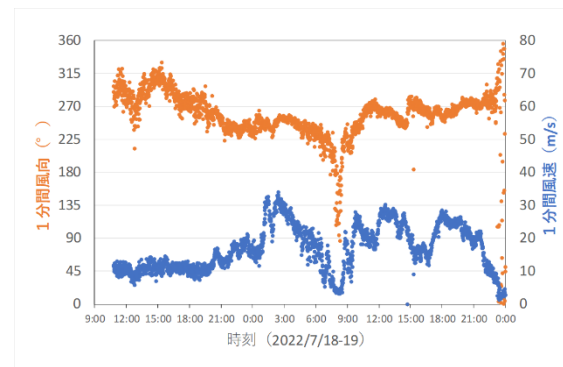


図5. 富士山頂での風向・風速
(1分値, 2022年7月18~19日)

富士山は観測タワー！～富士山頂および山麓太郎坊でのCO, O₃, SO₂観測～

加藤俊吾¹, 矢田茂久¹, 布袋愛斗夢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. 富士山環境研究センター, 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

富士山の麓にある太郎坊は高度1290mで、富士山頂の3776m、御殿場市街地の450mのちょうど中間程度に位置します。これまで富士山頂で近く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けれど、観測できる期間は商用電源が利用できる夏期だけでした。富士山中腹にある太郎坊は、一年中商用電源を利用できるため、通年で観測ができ、自由対流圏の大気も測定できるかもしれません。また、富士山体に沿って地表の空気が下降・上昇する山風・谷風がどの程度大気微量成分に影響を及ぼしているかを知るために、山頂と太郎坊での同時測定は有力な情報を与えてくれるはずです。そのため、夏期の山頂観測に加えて2020年夏期より太郎坊においてもオゾン(O₃)、一酸化炭素(CO)、二酸化硫黄(SO₂)の観測を行うことにしました。

2. 観測方法

富士山頂では2008年から、太郎坊では2020年8月からCO、O₃、SO₂の連続測定を行っています。CO、O₃、SO₂はそれぞれ赤外線吸収、紫外線吸収、紫外線の蛍光を利用した測定装置で観測をしています。温度や水蒸気などによって測定信号に影響を受けるのを補正するため、CO、SO₂は微量成分を含まないゼロガスを定期的に測定し、外気測定時のシグナルから引くことで濃度を決定しています。

3. 山頂と太郎坊のCO, O₃の比較

2022年の夏期の富士山頂と太郎坊のCO、O₃、SO₂それぞれの観測結果を図に示します。COは車の排ガスなど燃焼により発生するので、一般的に低い地点から上に行くほど低濃度になります。両地点のCOは山頂のほうで濃度が低く、山頂濃度から上乗せされるような形で太郎坊のCO濃度が変化をしています。越境大気汚染輸送などの長時間の大きな濃度変動に、山谷風による麓の都市域の汚染大気の影響が時々でていると解釈できます。一方、O₃については山頂のほうが太郎坊より高濃度となる逆の分布になっています。高い高度にある大気は成層圏のオゾン層からの影響を受けているためと考えられます。両地点でおおざっぱに同様な長期変動傾向がみられていますが、太郎坊のO₃が短期間に低濃度になっているところが多数みられます。これは主に夜間に起きており、大気が安定して地表面での反応でO₃が消失するためだと説明できます。

谷風により麓の汚染大気が山頂に輸送されていくという描像を想像していたのですが、CO、O₃の測定結果からはそのような輸送イベントが頻繁に起きている様子は捉えられて

いないようです。

一日の中での平均濃度変動を検討すると、山頂に比べ太郎坊ではかなり大きな日中のピークが見られました。日中に近隣の都市域から上昇してきた汚染大気の影響を受けていることがわかります。それでも夜間には比較的安定した濃度が測定されていて、夜間のデータのみを用いれば、関東近傍における自由対流圏の大気が測定できているようです。中国などからの汚染大気の長距離越境輸送は冬季・春季に起こりやすいのですが、この期間には山頂で観測ができません。代わりに、太郎坊での夜間データをもちいて冬季・春季の汚染大気の長距離輸送の影響を見ることができそうなので観測を継続していきたいです。

4. 山頂と太郎坊のSO₂の比較

山頂のSO₂は低濃度でごくわずかな変動しかありませんが、太郎坊では時々高濃度となるイベントが見られました。都市域からの汚染大気が到達した場合には同時にCOも上昇するはずなのですが、COの濃度上昇を伴わない場合が多く、火山ガスのSO₂が観測されているようです。太郎坊でのSO₂濃度上昇時に山頂でもわずかにSO₂が上昇する場合もあるため、火山ガスが輸送されたときの高さ方向の広がりに関する情報が得られて具体的な火山ガスの発生地点・輸送経路を探る手掛かりになりそうです。

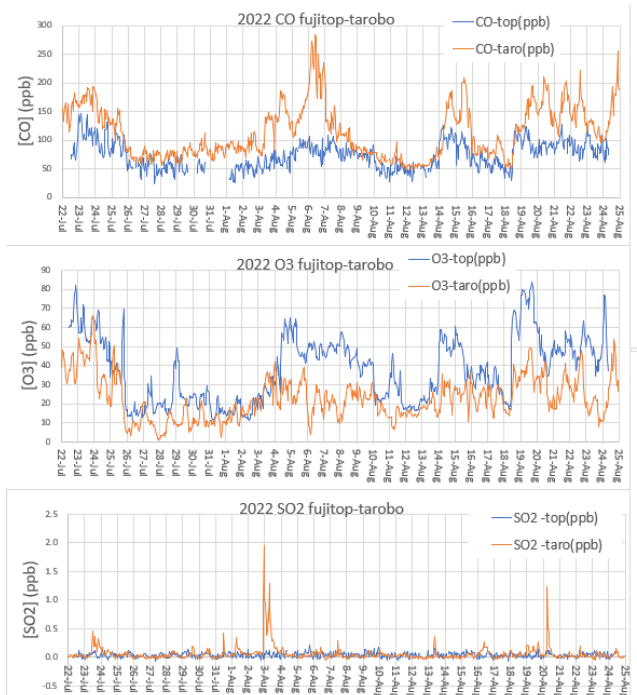


図 2022年夏期の山頂と太郎坊で観測されたCO、O₃、SO₂濃度

富士山太郎坊における越境汚染の通年観測手法の開発検討

佐藤颯人¹, 和田龍一¹, 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

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

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 O_3 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、寿命が長いいため、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 、 NO_2 、 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、自由対流圏の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に対応する大気の計測が出来れば、通年観測による年間を通じた越境汚染の評価が可能となる。本発表では、2021年と2022年に山頂と太郎坊にて同時観測を実施し、年間を通じた越境汚染の評価の可能性を検討した結果を報告する。

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1300 m)で NO 、 NO_2 、 NO_z 、 NO_y の観測を行った。観測期間は山頂が2021年および2022年8月、富士山太郎坊では2020年8月～2021年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、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(375 nm)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

山頂での観測が可能な夏期の2021年8月と2022年8月の山頂と太郎坊の観測結果を比較した。 NO_y 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(0:00-3:00)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 NO_y 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。データの選別方法を検討し、 NO_y 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_y 濃度の相関の近似直線は傾き0.97、切片0.03 ppb、係数0.59とよい相関を示した。これら手法を2020年9月～2021年8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。月別に示した NO_y 濃度を図1に示す。冬季に最大となる季節変化を得た。

4. まとめ

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、夜間のデータを用いることで遠方から移流した自由対流圏の気塊を観測できる可能性があることが分かった。

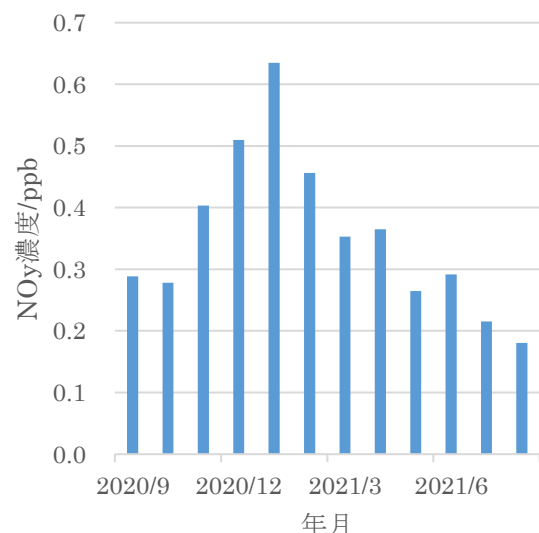


図1. 2020年9月から2021年8月までの夜間の富士山太郎坊における総反応性窒素酸化物(NO_y)濃度

富士山頂の昼・夜別 PM₁ の成分と大陸からの影響

米持真一¹, 村田浩太郎¹, 大河内博², Ki-ho Lee³

1. 埼玉県環境科学国際センター, 2. 早稲田大学, 3. Jeju National university, Korea

1. はじめに

東アジア地域のPM_{2.5}濃度は低下傾向が見られ、日本でも多くの地点で環境基準を下回るようになった。一方WHOは2021年に、大気質ガイドラインを従来の10 μg/m³ (年平均値) から5 μg/m³に引き下げた。この濃度はバックグラウンドレベルに近く、一層の濃度低下が求められる。

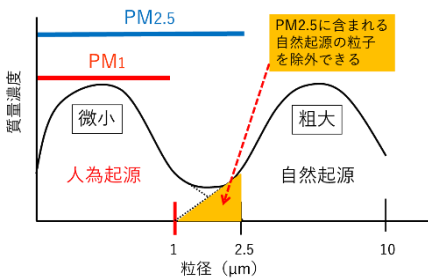


図1 大気エアロゾルの粒径と起源

PM_{2.5}には粗大粒子の一部も含まれることから、人為起源粒子の評価にはPM₁が適していると考えられる(図1)。

我々はこれまで富士山頂でPM_{2.5}採取を行ってきたが¹⁾、登山道などの富士山表層から舞い上がった粒子の影響を強く受けることから、これを避けるために2018年からはPM₁に着目し、2019年からは昼夜別の採取を行っている²⁾。

2. 採取方法と試料分析

旧富士山測候所1号庁舎に設置したPM_{2.5}サンプラー(2025i)の分級器をPM₁ Sharp cut cycloneに換えてPM₁を採取した。期間は2022年8月5日～8月19日である。途中台風上陸に伴う停電があり、採取プログラム修正に課題があったため、8月5日～11日は7時～17時と19時～5時の10時間採取、14日～19日は6時と18時にフィルター交換を行う12時間採取とした。採取にはPTFEフィルター (Teflo, Pall) を用い、1/2を水溶性無機イオン(IC法)、残りを無機元素(マイクロウェーブ酸分解-ICP/MS法) 分析に用いた。

3. 結果と考察

図2に期間中のPM₁濃度を示した。平均濃度は1.6 ± 1.3 μg/m³であり、昼夜別採取を始めた2019年以降最も低濃度であった。日中1.7 μg/m³、夜間1.6 μg/m³であり昼夜で差は見られなかった。埼玉県加須のPM₁濃度は4.3 μg/m³であった。

図3に我々が石炭燃焼の指標として注目しているAs(ヒ素)とV(バナジウム)の比(As/V)と土壌粒子の指標元素であるAlの変化を示した。As/V比は8月15日日中に最大値3.7となった。14日に台風が関東上空を通過後、高温となる地域

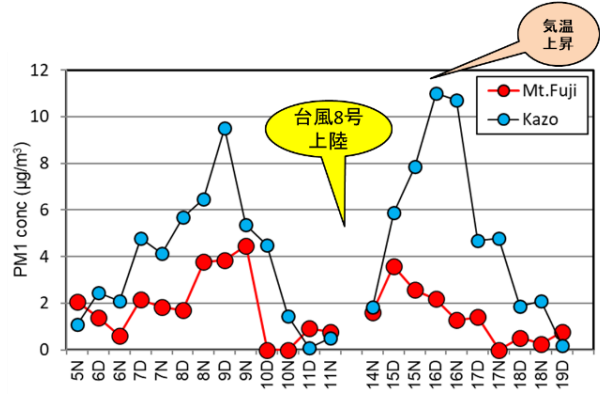


図2 2022年8月の富士山頂と埼玉県加須の昼夜別PM₁濃度。 D:日中, N:夜間

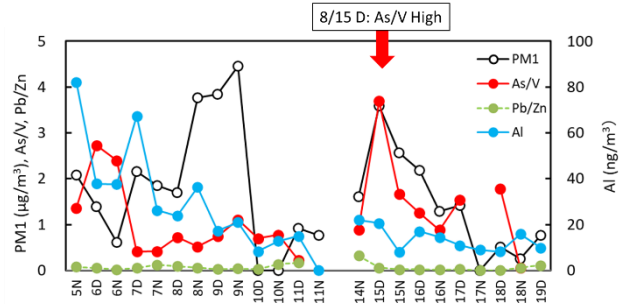


図3 富士山頂PM₁中の無機元素比とAl濃度

が見られたが、大気不安定となり上空に大陸からの空気塊が流入したためと考えられ、後方流跡線も大陸からの空気塊流入を示唆していた。また、これまで見られた夜間のAs/V比の上昇はこの期間には見られなかった。

4. おわりに

夏季の昼夜別PM₁採取を2018年から4年間(2020年は実施せず)行ったが、PM濃度の低下とともに元々低濃度の元素は更に濃度が低下し、分析だけでなく、試料採取、前処理も含めた精度管理の重要性が増している。また、PM_{2.5} 中人為起源粒子の低下に伴い、対策の対象ではない自然起源粒子の占める割合が相対的に高まっている可能性があり、再度自然起源粒子も含めた評価を行う必要があると感じている。

参考文献

- 1) 米持真一ほか:富士山頂における昼夜別に採取したPM_{2.5}中の無機元素による発生源解明, 分析化学, **70**, 363-371 (2021).
- 2) 米持真一ほか:大陸から富士山頂に運ばれたPM₁の化学成分の特徴, 第15回成果報告会講演予稿集, p.7 (2022)

富士山頂でPM_{2.5}, 雲, 雪からマイクロプラスチックを発見!

○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, 横山勝丘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

マイクロプラスチックってなんだろう?

直径5mm 以下のプラスチック片をマイクロプラスチック (microplastics: MPs)と呼んでいます(図1). 柔軟剤や肥料に使われるマイクロカプセル, 洗顔剤や歯磨き粉に使われるマイクロビーズのように5mm 以下のもの, 屋外使用を目的にしたプラスチック製品や不適切廃棄されたプラスチック製品が摩擦や太陽光によって微細化されて5mm 以下となったものがあります. 前者を一次MPs. 後者を二次MPs といいます. 屋外使用を目的とした製品としては人工芝, 農業用ビニールハウス, 自動車タイヤ, ポリマー改質アスファルト, 道路標識などがあります. 不適切廃棄されたプラスチック製品は様々なものがありますが, 不織布マスクもプラスチック製品です.

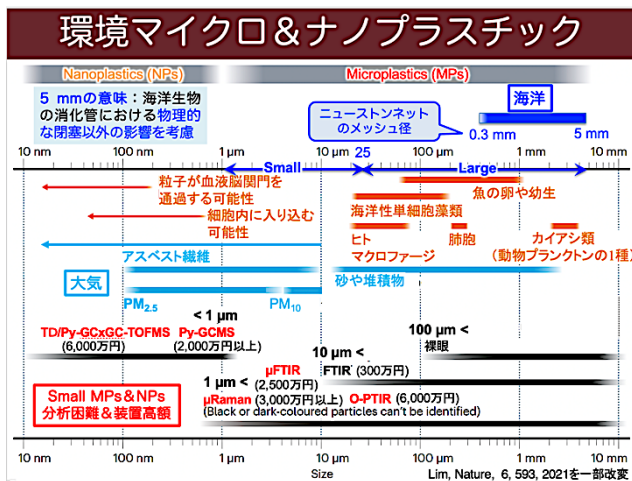


図 1 マイクロプラスチックって何?

大気中マイクロプラスチックなぜ重要な?

ヒトは1日に2万回以上の呼吸をしており, 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. モデル研究によると, MPs は食物や飲料水よりも呼吸により空気を通じて体内に取り込まれる量が多いそうです. 飲食によって取り込まれたMPs は排便や排尿によって体外に排出されますが, 肺胞まで運ばれると長期間留まることになります.

体内からマイクロプラスチックは見つかった?

肺, 喉(痰), 妊娠女性の胎盤(母胎, 胎児側の双方), 母乳, 血液, 排便からMPs が見つかっています. 肺では深部ほどMPs が多く, 最深部の肺胞からも見つかっています.

海洋と大気中のマイクロプラスチックはなにが違うの?

MPs の材質, 形状は海洋でも大気でも変わりません. 海洋と大気でMPs にどんな違いがあるのでしょうか?それは大きさです. 海洋MPs は“目に見える”大きさの0.3mm から5mm が主な対象でしたが, この大きさは重力によってすぐに落下します. 大気では, 呼吸により体内に取り込む可能性が高い10μm 以下の粒子(PM₁₀), 2.5μm 以下の粒子(PM_{2.5})のMPs が対象となります(図2). AMPs は“目では見えない”のです. 1μm より小さいナノプラスチック(nanoplastics; NPs)は細胞膜を通過しますので, 血液により全身に循環します. 脳にも運ばれているかもしれません. ただし, 10μm 以下のMPs やNPs は分析が難しく, 実態はよく分かっていません.

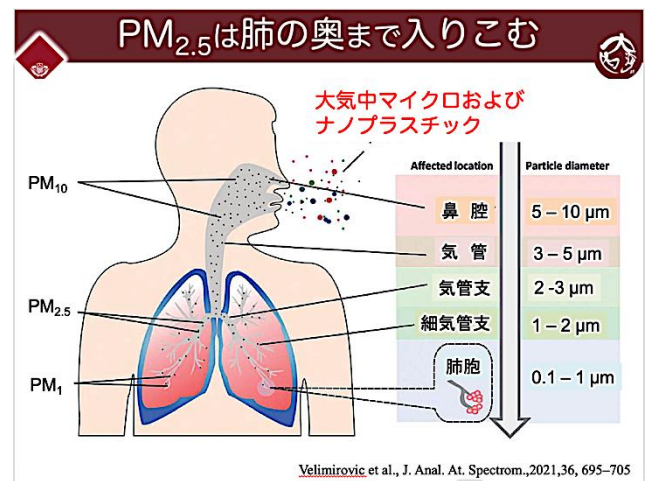


図 2 マイクロプラスチックの呼吸によりどこまで運ばれる?

大気中マイクロプラスチックが環境に及ぼす影響は?

MPs は紫外線劣化によりメタンなどの温室効果ガスを放出します. 上空ほど紫外線が強いのでAMPs から温室効果ガス放出量が多いかもしれません. また, AMPs が太陽光を吸収したり, 散乱したりして地球の温暖化や冷却化に関与する可能性もあります. さらに, AMPs が雲粒を作る能力が高ければ, 雲形成により太陽光の吸収や散乱に影響を及ぼし, 降雨量分布を変化させる可能性があります. AMPs が大気を通じて極域に運ばれて蓄積すると生態系破壊を引き起こす可能性があります. 現状では可能性が指摘されているだけで分からないことだらけです.

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？

富士山頂では7月から9月まで登山客で賑わいますが、これ以外の期間に住んでいる人はいません。なぜ富士山頂でマイクロプラスチックを調べるのでしょうか？この理由を知るには大気構造を知る必要があります。

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。自由対流圏は地上部の影響を受けにくいので風が強く、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、低気圧や夏期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(図3)。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。

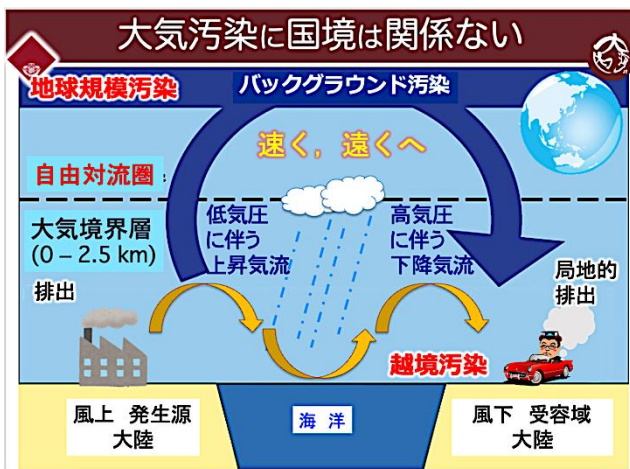


図3 越境汚染と地球規模汚染

富士山頂で見つかった大気中マイクロプラスチックはなに？

私達は2019年夏期から富士山頂でPM_{2.5}を採取しています。2020年はコロナ禍のために観測を断念しましたが、2021年、2022年にも観測を行いました。見つかったAMPsの材質は、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)、ポリスチレン(PS)、ポリエチレンテレフタレート(PET)、アクリル樹脂(PMMA)、アクリロニトリブタジエンスチレン共重合体(ABS)、ポリカーボネート(PC)、ポリウレタン(PU)、生分解性プラスチックであるポリヒドロキシ酪酸(PHB)、ポリビニルアルコール(PVA)です。自動車タイヤ磨耗塵と推定されるAMPsも検出されています。

積雪からも大気中マイクロプラスチックをはじめ検出！

NPO法人富士山測候所を活用する会では、夏期観測を安全に行うため登山家(山頂班)を雇用して運営を行っています。山頂班は様々な技術や経験を有するので観測補助作業もお願いします。富士山頂でのPM_{2.5}観測は夏期に限られますが、山頂班が開所準備で富士山頂に登山した春季に積雪を採取してもらいました。富士山頂の積雪には119個/LのAMPsが含まれていましたが、エベレストや南極の雪氷よりも高く、スイ

ス・アルプスや北極よりも低い値でした。富士山頂ではどの地点よりもAMPsが小さく、破片状のポリプロピレン(PP)が主成分であることが分かりました。これはPM_{2.5}と同じでした。



図4 富士山頂で春に採取した積雪から検出されたAMPs

おわりに

富士山頂でAMPs観測を行うと、地球規模汚染の実態解明に繋がります。中国ではAMPs濃度が高く、北京で5000個/m³を越えています。大陸から大気へ放出されたAMPsが偏西風によって地球全体に輸送されている可能性があります。日本は大陸の風下直下にありますので、富士山頂で観測を行えば主な発生源である大陸の影響をいち早く検知できます。発表では雲水中AMPsの紹介もします。雲にAMPsが含まれていれば“プラスチックの雨”が降ります。雨は農作物の生育に不可欠であり、飲料水の源です。大気中マイクロプラスチックは飲食によっても体内に取り込まれるかもしれません。

関連記事

- 2023年1月6日掲載:富士山頂の積雪からマイクロプラ、進むプラスチック汚染,
<https://news.yahoo.co.jp/articles/d828f8f11ba630571a29657f2e6806d6c40ebf85>
- 2023年2月15日掲載:日本の研究グループがハトやツバメの肺からマイクロプラ検出、野鳥の肺からは世界初,
<https://news.yahoo.co.jp/articles/da75f00ab15498b4358395e394adb023b502046f>
- 2023年2月16日掲載:私たちはすでに吸い込んでいる、大気中に広がるプラスチック汚染,
<https://www.globeride.co.jp/features/page16>

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2022年度受託事業により行った。

新たな CO₂ 検出部を用いた富士山頂での大気中 CO₂ 濃度観測

野村渉平, 寺尾有希夫, 向井人史
国立環境研究所

1. はじめに

国立環境研究所は、1 年の大半で商用電力の供給がない富士山測候所を利用して、富士山頂周辺の大気中 CO₂ 濃度を観測するために、通年で高精度に CO₂ 濃度測定が可能なバッテリー電源により稼働する省電力型の CO₂ 濃度観測システムを開発した。それを 2009 年に富士山測候所に設置し、富士山頂の CO₂ 濃度観測を開始した。本報では、これまでに得られた観測結果を報告する。

2. 結果

2-1. 2021-2022 年の観測成功

2009年夏期から富士山頂での大気中CO₂濃度の観測で用いてきたCO₂検出部を2021年夏期に撤去し、代わりに従来のCO₂検出部より省電力化された新たなCO₂検出部をCO₂濃度観測システムに導入した。2021年8月からの越冬観測は、新たなCO₂検出部を導入して初めての越冬観測であったが2022年7月まで安定した観測が行えた。

2021年8月から2022年7月の越冬期間中にバッテリー100個の電圧値は、0.44V低下した。旧型のCO₂検出部を用いていた時の越冬期間中のバッテリー100個の電圧値は、平均して0.58V低下した。このことから、CO₂検出部を新調したことにより年間消費電力を約23%減らすことに成功した。

新 CO₂ 検出部の消費電力量は、計算上旧型のその半分程度のため、富士山頂での越冬期間中のバッテリー100 個の自然放電による電圧低下は約 0.3V であることが示唆された。

2-2. 通信の不通

富士山頂に設置されたCO₂濃度観測システムは毎晩観測が実施された直後に衛星通信により観測データが送信される体制であったが、2021年7月にCO₂検出部を新しいものに交換した直後から、観測データの送信が途絶えた。

2022年7月にCO₂検出部を回収して調べた結果、通信用の基板に強い電気ノイズが侵入したことにより故障した可能性が明らかとなった。また通信用アンテナの位置を様々な場所に変更して通信状況の回復を図ったが、改善は見られなかった。今後、通信手段の変更や通信用の基板の改良を実施していく。

2-3. CO₂ 濃度

季節変動成分を取り除いた長期トレンドでの2021年8月の月平均CO₂濃度は420.1 ppmであり(図1(a)), 前年同月と比較すると2.1 ppm高い濃度であった。2026年前後にパリ協定で

一つの目安となっている1.5°C上昇の条件と想定されている大気中CO₂濃度430 ppm到達すると考えられる。

2-4. ラニーニャ現象下での CO₂ 濃度増加率

富士山頂のCO₂濃度増加率の周期性は、マウナロア観測所のそれと同様にエルニーニョ/ラニーニャ現象の周期性に類似していた(図1(b))。富士山頂でCO₂観測を開始して以降、ラニーニャ現象は4回発生し、そのたびに富士山頂のCO₂濃度増加率は低下する傾向を示している。2020年以降に発生しているラニーニャ現象の強度は、2010年に発生したラニーニャ現象と強度に近いが、2010年のCO₂濃度増加率の急激な減衰は見られず、2021年8月-2022年8月のCO₂濃度増加率は約2.0 ppm yr⁻¹であった。

これは COVID-19 の感染拡大防止対策による経済停滞の改善とロシアによるウクライナ侵攻によるエネルギー分野への影響が寄与していると考えられる。

2-5. 富士山頂でのフラスコサンプリング

富士山頂での自動大気採取を始めてから5年目を迎えた。その間、2019年春季にフラスコサンプリング用のバッテリーの電圧低下によるサンプリング失敗や、2020年7月から2021年7月にCOVID-19感染拡大防止対策での測候所閉鎖によるサンプリングの中断があった。

今年度は、装置の改良による安定したフラスコサンプリング体制の整備と、現在の年12回の大気採取頻度の倍増を目指し、新たなフラスコサンプリングの開発を実施した。

図2で示したように富士山頂のδ¹³C-CO₂は、他の観測点と同様に軽くなる傾向が示された。また図3で示したように富士山頂のCH₄濃度、CO濃度およびN₂O濃度はマウナロア観測所のそれより高く、また富士山頂とマウナロア観測所のCH₄濃度、CO濃度およびN₂O濃度の周期性は類似しており、アジア域で排出されたCH₄、COおよびN₂Oが全球の濃度に影響を与えていることが示唆された。

3. おわりに

ハワイ島のマウナロア観測所は、2022年11月29日にマウナロア山から噴出したマグマにより、送電網が消失し、観測所にアクセスする道が塞がれた。そのため現在マウナロア観測所では、週1回の臨時のフラスコサンプリングのみが実施されている。そのため北半球の高山で実施されている富士山頂での温室効果ガス観測は、これまで以上に重要な役割を担っていくと予想される。

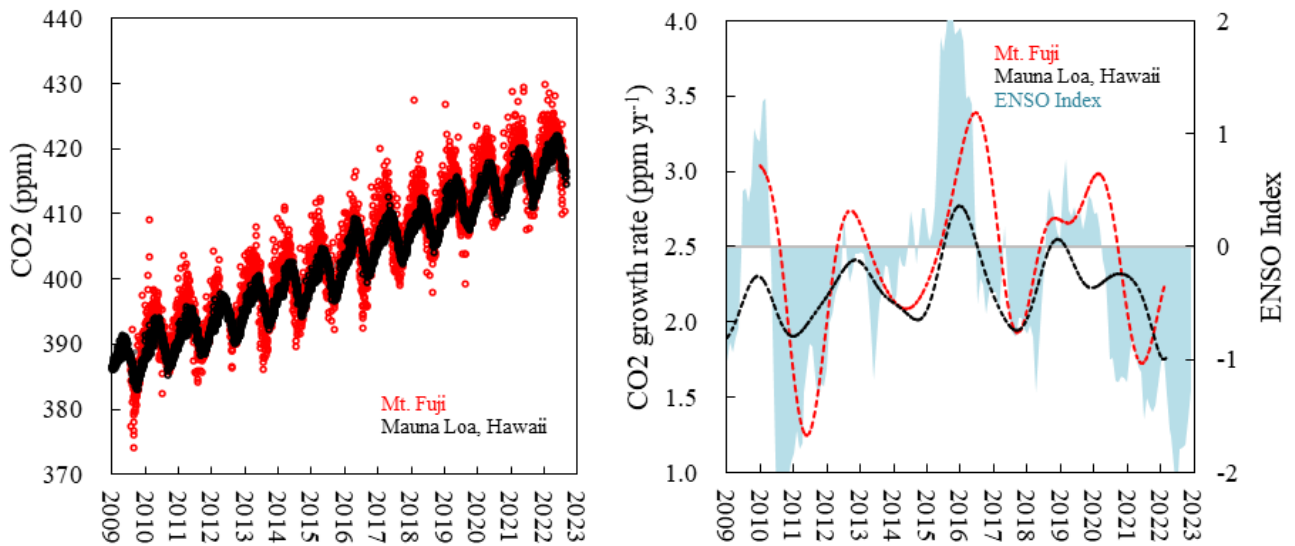


図1. 富士山頂とマウナロア観測所の(a)連続観測により得られた大気中 CO₂ 濃度と(b)そのデータセットから求められた CO₂ 濃度増加率と、ENSO Index

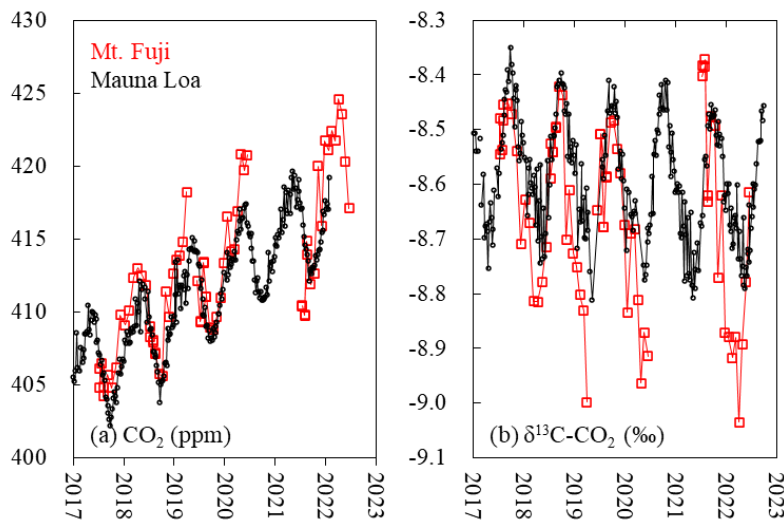


図2. 富士山頂とマウナロア観測所の(a)フラスコサンプリングにより得られた空気試料中 CO₂ 濃度と(b)δ¹³C-CO₂

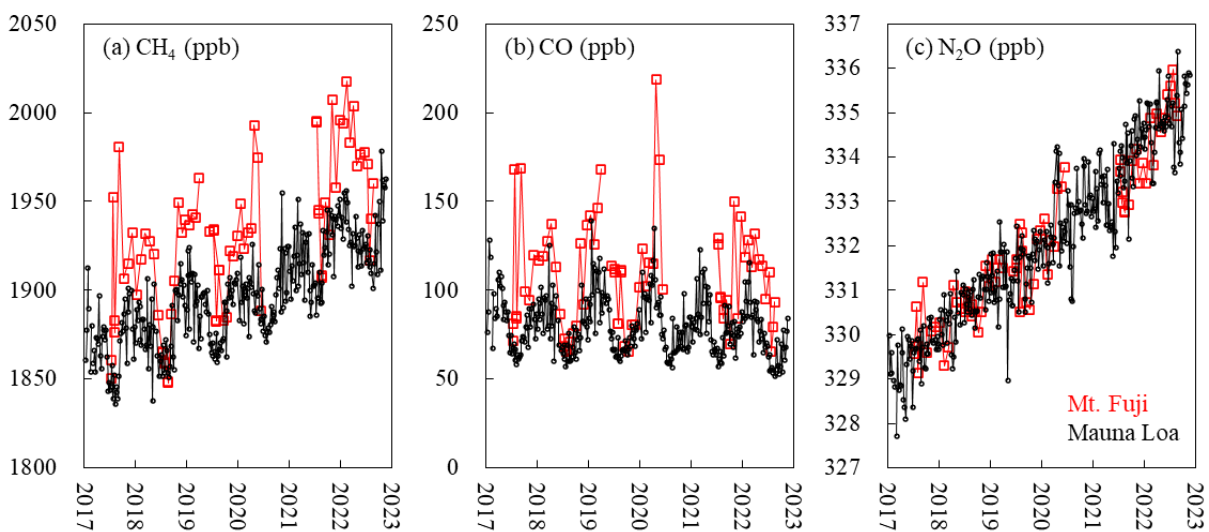


図3. 富士山頂とマウナロア観測所の(a)フラスコサンプリングにより得られた空気試料中 CH₄ 濃度、CO 濃度および N₂O 濃度

富士山測候所庁舎内での CO₂ 濃度変動の測定

前田源次郎¹

1. 秋田大学理工学部通信制教育講座受講生

1. 概要

新型コロナウイルス感染症の感染予防対策として富士山測候所(以下:庁舎)においても天候条件が許せば可能な時間帯に出入り口を開放する, 換気ダクトを接続したファンを駆動するなどの徹底した換気が行われている。しかしながらそのために庁舎内の室温が低下し居住性が低下することが懸念される。

また夜間や悪天候時には屋外への排気や屋外からの入気が難しくなるとともに滞在者の人数が多くなるのでこの間に感染対策の指標になるといわれている室内の二酸化炭素の濃度が大きく上昇すると考えられこれらの2つの状況を通して実態を把握することは重要である。

しかしながらすでに多数の装置が設置されている中で新たに既設の電力設備を使用するのは非常に困難である。

本稿においては鉛バッテリーによる独立電源を用いて庁舎内での人の出入りによる二酸化炭素の変動を測定する装置を自作して山頂で測定を行う前に筆者自宅でおこなおうと試みた結果について報告するものである。

2. 測定装置の構成

当初, 使用を予定していたデータロガー(7チャンネル)が故障したためセンタからのデータ収集項目を再構築して次のような構成で自作した。

2.1 二酸化炭素センサ(NDIR(非分散型赤外)方式の MH-Z14B)

(不具合のため, 固体電解質型 CO₂ センサ(MG812)に変更。

2.2 人検知用センサ(超音波式測離センサの MB1013)

2.3 風速計(熱線式, インターフェース 2022 年 2 月号付録プログラミング学園電子工作部 No1.p28-p33 掲載)

2.4 気温計測用として温度センサ IC(MCP9700-AE)

2.5 鉛バッテリー WP1236W(12V,9Ah)

2.6 電源供給部(DCDC モジュール, シリズレギュレーター)

2.7 データロガー MCR-4V

3. 試験の概要と発生した不具合と山頂での試験について

2. で前述した構成による試験を筆者宅で開始する前に各装置で個別に動作試験をおこなったがその過程で非分散型赤外型の二酸化炭素センサを通電してエイジングをおこなっている途中で電圧が変動しない現象が確認されたこと(設置環境によっては外光による影響を受けることが懸念されたた

め)を固体電解質型 CO₂ センサモジュールへと変更して本試験を開始した。

計算していたバッテリーの消費時間まで装置を駆動して試験を数回繰り返したところ就寝中ははっきりと聴覚可能なほどの発振音が発生し, 設置場所によっては山頂使用者の就寝を妨げる恐れがあったため原因究明に時間がかかった。

その後, 鉛バッテリーの消耗が想定よりも激しく出力電圧が極端に低下して電源回路内のDCDCモジュール, またはシリズレギュレーターの入力電圧の限界以下に低下して発振をおこした疑いがあることが判明した。

このような事情のため山頂庁舎内では試験を行うに至らなかった。

4. 今後の展望

周囲の気温, 気圧を変えられる装置内で山頂に設置したのと同じ環境を再現して装置が現地に置いた場合に正常に稼働するのか, また一般建物内に設置して人の有無や屋内に吹く風の速度による CO₂ 濃度の変動をとらえられるか試験し結果を検討する予定である。

(その後の進展などは成果発表会で発表する)

気温を下げるエアロゾルは減っているか

○三浦和彦^{1,2}, 平野至心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,
森 樹大⁷, 矢吹正教⁸, 青木一真⁹, 鴨川 仁¹⁰

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.慶應義塾大学, 8.京都大学, 9.富山大学, 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. 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)などの気体が粒子化する現象を新粒子生

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, その例も自由対流圏で生成し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(3776m)で2006年から観測を始めました. 富士山頂は自由対流圏に位置することが多く, NPFのメカニズムを調べるためには最適の場所です.

2. 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(図1上)¹⁾. 走査型易動度分析装置(SMPS, DMA3081+CPC3775)を用い粒径約15~470nmの粒径分布を測定しました. 図1下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³⁾. 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?

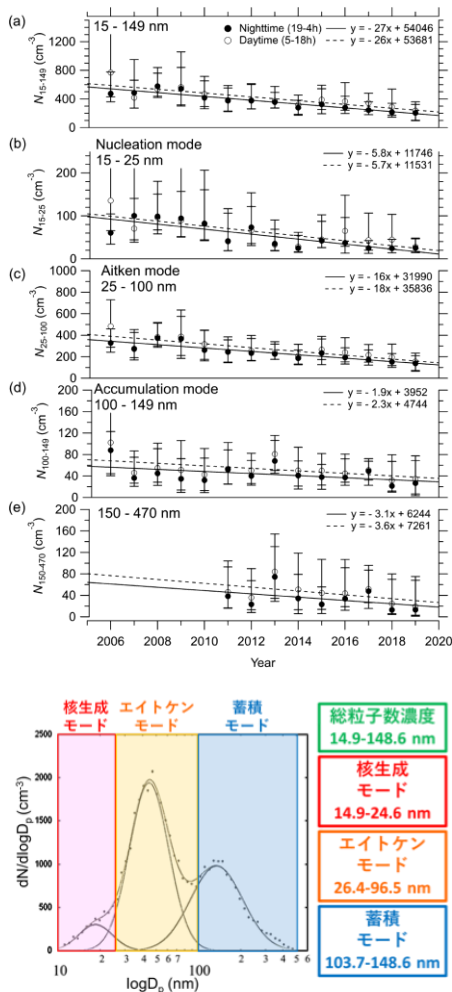


図1 2006年~2019年夏期に山頂で測定した粒径分布の経年変化(上)¹⁾と各モードの説明図(下)²⁾

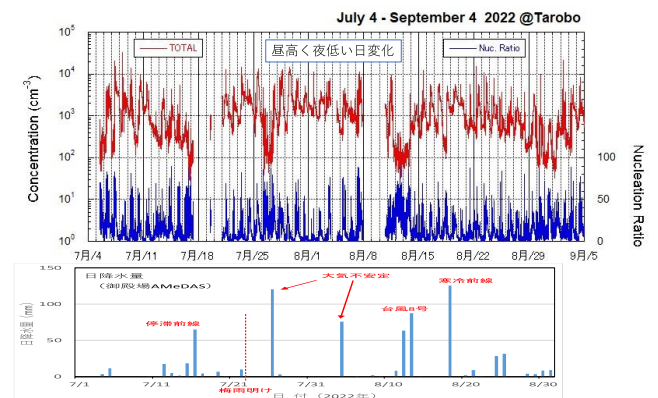


図2 2022年夏期集中観測に太郎坊で測定した総粒子濃度, 核生成モードの割合(上)と御殿場における降水量(下)

3. 太郎坊での観測

太郎坊(1290m)でのエアロゾル観測は山頂に先立ち2005年から夏期を中心に散発的に行っていました。2020年はコロナ感染を避けるために山頂での夏期観測が中止になり、8月から太郎坊で連続観測を再開しました。2022年夏期の測定結果を図2に示します。総粒子濃度の変化は2021年夏期⁴⁾と同様、日中高く夜間に低いという日変化が見られます。また台風、前線の通過に伴い降水量が増加すると、濃度が減少していました。ま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に同じ装置で同じ粒径範囲を測定した粒子濃度の経年変化を示します。2017年から2022年夏期の濃度変化を見ると、特に減少しているように見えません。夏期に核生成モードの割合が減少しており、NPFイベントが少なかった可能性があります。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年夏の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が⁹⁾、2014-2015年の解析結果では、広葉樹が落葉する冬期の方がNPFイベントが多くなりました⁶⁾。

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。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(22H03732)(代表 矢吹正教, 2022-2024年度)の助成により行われた。

参考文献

- 1) 五十嵐博己ら(2022)夏季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) 五十嵐博己(2020)山岳部と都市部における新粒子生成イベントおよび粒子成長に関する研究, *東京理科大学理学研究科物理学専攻2019年度修士論文*, pp62.
- 3) 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
- 4) 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, 14-15.
- 5) 平野至心(2021)富士山太郎坊における新粒子の特徴, *東京理科大学理学部第一部物理学科2020年度卒業論文*, pp20.
- 6) 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.

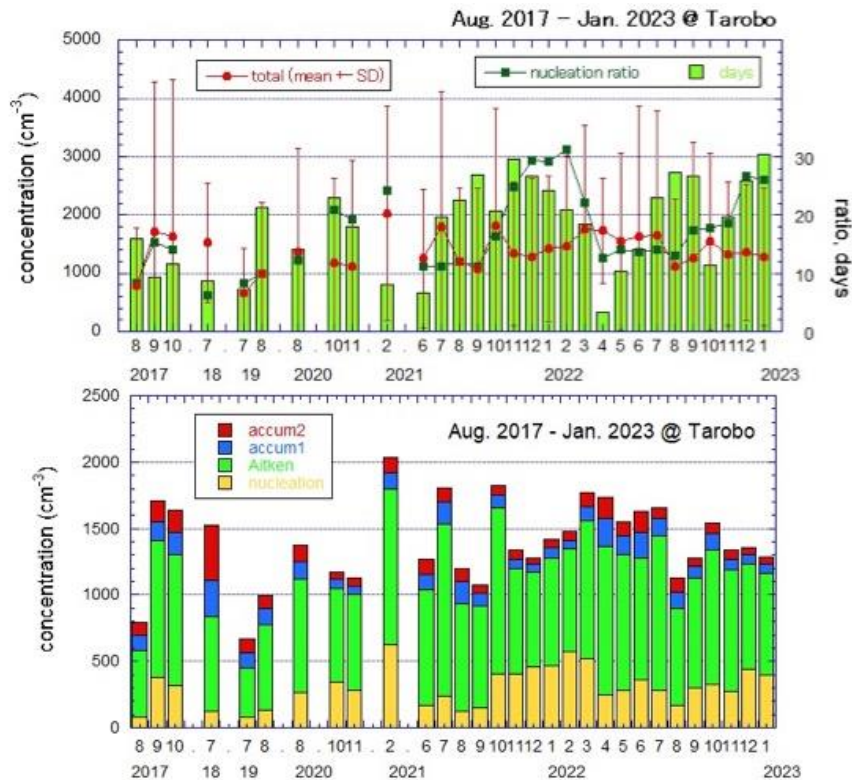


図3 2017年8月～2023年1月まで太郎坊においてSMPSで測定した総粒子数濃度, 核生成モードの割合, 観測日数の経年変化(上)とモード別粒子数濃度の経年変化(下)

雲の中の氷の種を探す－富士山頂での氷晶核観測 2022

村田浩太郎¹, 米持真一¹, 大河内博², 鴨川仁³

1. 埼玉県環境科学国際センター, 2. 早稲田大学, 3. 静岡県立大学

1. はじめに

雲は水滴や氷でできているが、その形成には水分の核になる大気中微粒子の存在が必要不可欠である。核になる微粒子には、水滴の核になる凝結核と氷の核になる氷晶核がある。これらは雲の構造や範囲、放射特性(雲が地球を冷やすか暖めるか)に関係し、最終的に気象や気候に影響を与えるが、とくに氷晶核についてはまだ情報が少ない点が多く、研究が求められている。

身近な現象として、氷晶核は降水に深く関係するものである。日本に暮らす我々が経験する降水の多くは上空での氷形成から始まるものであり、地上に届くまでに溶けたかどうかにより雨、雪、みぞれ、あられなど呼び名が変わる。氷の種になる氷晶核が上空にどれほど存在するのか理解することは、降水現象そのものを理解することに繋がり、ひいては将来起こりうる気象や気候の変化の予測に役立つ情報になる。

筆者らは、2019年と2021年の観測で山頂での大気中の氷晶核の濃度を計測し、その変動幅と変動要因を推定することができた。ただし、実際の雲の中に存在する氷晶核がどの程度であるかについては検討できなかった。そこで2022年度は雲の中の氷晶核濃度を明らかにすることを目的とし、雲水の中の氷晶核計測に挑戦した。

2. 方法

2022年7月18日から2022年9月3日まで富士山測候所西側に吸引式の試作雲水サンプラーを設置した。この装置は、ポンプで空気を吸引してメッシュを通し、捕捉された水を容器の中に貯めていくものである。2021年の観測から、昼間は山由来の鉱物粒子が大気中に多く巻き上げられて氷晶核となることが分かったため、その吸い込みを避けるために夜間(20時～4時)のみポンプ稼働した。本装置は方法論として確立されたものではなく、ひとまず雲水に含まれる氷晶核の濃度範囲を把握するための簡易的な装置である。合計4試料が得られた。

より確立された装置として、早稲田大学グループが継続して使用しているパッシブサンプラーで集められた雲水試料も分析した。2022年7月26日から2022年8月16日までの15試料の分析を行った。

氷晶核計測は自作の装置によりおこなった。純水を特殊な環境で冷却すれば-34℃前後まで凍結しないが、氷晶核を含む場合はそれよりはるかに高温で凍結する現象を利用した手法である。雲水試料の液滴を冷却し、温度と凍結率から氷晶核数を算出した。

3. 結果と考察

夏期の富士山頂における雲水量(1 m³の雲に含まれる水の量)は0.01～0.26(平均0.05) g m⁻³と報告されている¹⁾。この値を用いて、雲水中の氷晶核数濃度を大気中濃度に換算し、2019年と2021年の大気中氷晶核数濃度と比較した(図1)。横軸は活性化温度(氷点下何度で氷晶核としてはたらくか)、縦軸は空気 1 Lに含まれる氷晶核の数である。雲水中の氷晶核数は大気中よりも低い傾向であり、両者は必ずしも同等ではないことが分かった。また、既往研究の濃度範囲と比べたところ、富士山頂の雲水中氷晶核数濃度は低い傾向で、比較的氷晶核が少ない雲が多いことが示唆された。我々が観測したのは水滴でできた雲であるが、さらに上昇する過程を経ると氷を含む雲となる。氷晶核に乏しい雲は上昇過程において氷形成による降水(つまり、雲の破壊)が生じにくく、より発達しやすい可能性があるのかもしれない。大気と雲の氷晶核数の違いについての真相究明に加え、富士山の雲発達の要因という観点も踏まえて今後検討していきたい。

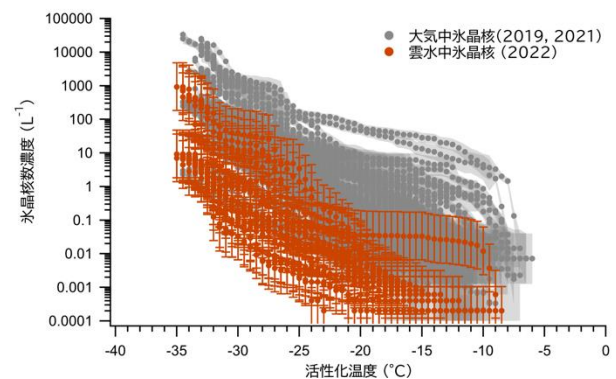


図 1 大気中氷晶核と雲水中氷晶核の濃度比較。雲水中氷晶核については、雲水の報告値の平均、最大、最小値から換算した大気中濃度をエラーバーで示した。

謝辞

試料採取にあたり、認定NPO法人富士山測候所を活用する会の山頂班の皆様にご協力いただきました。本研究は科研費22K14102, 19K14793, 19H00955, 18J01761により行われました。

参考文献

- 1) Iwamoto, Y., Watanabe, A., Kataoka, R., Uematsu, M., Miura, K. (2021). Aerosol–Cloud Interaction at the Summit of Mt. Fuji, Japan: Factors Influencing Cloud Droplet Number Concentrations. *Appl. Sci.*, **11**, 8439.

ドローン採取による雲滴分析 ～個々の雲滴から雲の情報を知る～

南齋勉¹, 神谷祐翔¹, 山本祐志², 大河内博³

1. 静岡理科大学, 2. グリーンブルー(株), 3. 早稲田大学

1. はじめに

雨雲は雲粒核となるエアロゾルに水分子が凝結することで形成され、粒子状物質やガス成分の取り込みや、水蒸気による吸湿過程を経て成長する。一般的に、雨や霧などの湿性沈着物中の化学組成の分析を行う際、採取装置に回収したサンプルに対して行われるため、これらの成分は時間・空間的に平均化される。このため、従来の採取法では、雨水が持つ詳細情報は失われている。雲粒の核形成から、雲粒への大気汚染物質の沈着、雲粒中における液相反応の解明には、時間空間分解能に優れた採取分析手法が重要である。

現在まで、雨一滴の成分定性や、液滴径の計測に関する報告はあるが¹⁻⁶⁾、採取と計測の難しさから溶存成分の定量に関するものはほとんどない。われわれは、図1に示すような、ゲル薄膜に含まれる溶質と雨中の溶存イオン成分による結晶生成を利用することで、一滴の雨滴の成分を簡便に定量する手法の確立を目指してきた^{7,8)}。その結果、硫酸塩について、本手法の検出感度と分析精度は、実環境試料に耐えうるレベルに到達してきたので、2020年度から実環境における雨粒や雲粒のサンプリングを行なっている。

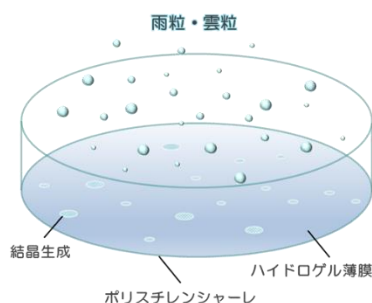


図1 結晶生成を利用した雨粒採取分析ツール

この手法を用いた採取分析対象として、地表(静岡県西部に位置する静岡理科大学)において観測された降水イベントにて初期降水の雨粒を採取した。また、富士山山頂測候所において、夏期に雲粒採取を行なった。さらに、ドローンサンプリングとして、2020年12月9日に富士山麓5合目太郎坊から上空150mへの飛行によって、雲粒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。雨粒と雲粒の粒径分布と、液滴中の硫酸塩濃度分布を比較することで、雲粒形成から降水までの成長過程の解明につながる事が期待される。

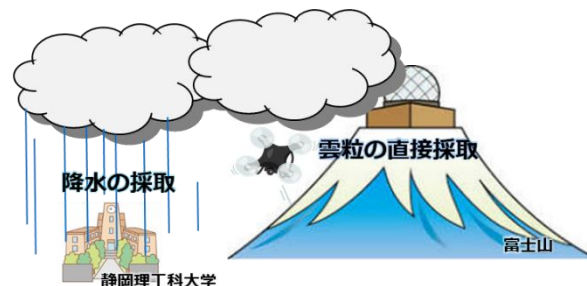


図2 地上と富士山頂におけるサンプリング

2. 採取と観察の方法

雨粒採取分析ツールは以下の手順に従って作製した。5 mM の塩化バリウム水溶液に 5wt% となるようにゼラチンを加え、加温しながら3時間攪拌させた。この溶液を内径33 mm のポリスチレンシャーレに塗布し、減圧条件のデシケーター内で2日間静置し、その後はアルミジップロック内に入れて保存した。降水を確認した際に、ツールをアルミジップロックから取り出し、シャーレの内面には塗布されたゲル薄膜上に雨粒が載るように3分間暴露し、シャーレの蓋を被せたのち、再びアルミジップロック内に収納した。

富士山頂における採取は、2022年8月17日10時から19時まで、1時間ごとに計10回の採取を行なった。当日、測候所は常に雲内に入っていた。

富士山5合目の太郎坊大気観測サイトにおけるドローンサンプリングは、以下のとおり行なった。小型マルチコプター Phantom4(グリーンブルー社;図3)上に採取ツールを貼付し、2020年12月9日8時から12時まで、高度1440mへの計4回のフライト(飛行時間:2~14 min)を行なった。

採取後の試料は、研究室に戻ったのち、デジタルマイクロ



図3 雲粒採取に用いたクアッドコプター

スコープ (KEYENCE VHX-7000) で、雨粒もしくは雲粒の浸透により生成した硫酸バリウムの結晶を撮影し、画像処理ソフトを用いて、液滴粒径と、結晶ピクセル数を計測し、それぞれの分布について検討した。

3. 一滴ごとの分析から雲粒の成長過程に迫る

図4に、2020年12月9日の4回のドローン採取で得られた試料についての雲滴跡の直径分布を示す。10–135 μmの範囲での分布が確認され、これまでに報告されている雲滴の粒径分布とおおよそ一致していた¹¹⁾。それぞれの採取期間における直径分布には違いがあることから、時間とともに雲内の状況が変化していることが伺える。08:00では、30–35 μmの小さな直径で極大を持ち、直径が大きくなるとともに単調に減少する分布が見られたが、10:35や11:02では、それぞれ75–80 μm、80–85 μmの大きな直径に極大をもつ分布が確認され、時間と共に直径が大きくなっていく傾向が見られた。また、10:45では30–100 μmで広く分布する結果となったが、10:35の採取時から11:02の採取前には小雨の降水が確認されたことから、10:45は降水中であることが分かる。これらの結果から、降水期間以外は、吸湿による雲滴の成長により、雲粒の粒径が揃ってくる成長過程が示唆され、降水期間では、大きく成長した雲滴が消失したと考えられる。

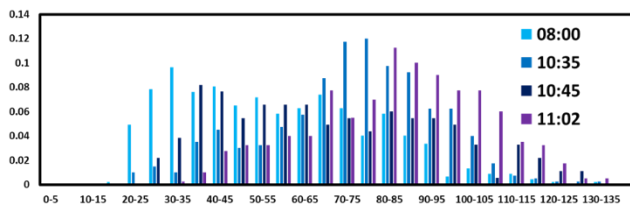


図4 太郎坊上空 (高度1440 m) でドローンにより採取された雲滴跡の直径分布

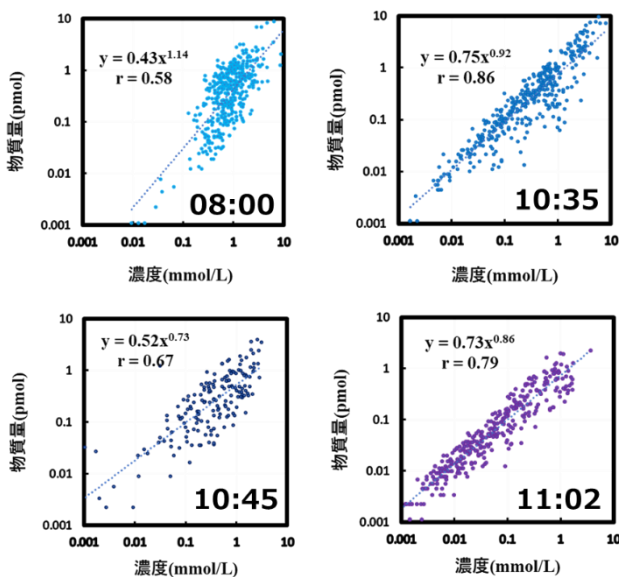


図5 太郎坊上空でドローン採取された雲滴中の硫酸塩濃度と硫酸塩物質量の相関関係

図5は4回のドローンサンプリングによって採取された雲滴について、個々の雲滴中に含まれる硫酸塩の濃度と物質量の相関関係を示す。雲滴粒径分布が小さい8:00や、降水が確認された10:45の採取期間でも同様の相関は見られたが、10:35と11:02のデータでは、より高い相関性が見られた。この直線的相関は、雲滴の体積分布が狭いことを示している。前述のような雲滴の吸湿成長によって、体積分布が収束してくると考えられる。本発表では、2022年夏期に富士山頂で採取された雲滴データや、地上で通年採取された雨滴の情報に関して検討した結果についても報告する。

4. おわりに

一滴ごとの雲滴や雨滴中に含まれる硫酸塩の物質量と、その液滴体積、それらから見積もった濃度の、それぞれの情報を並べてみることで、個々ではバラバラの情報を持つ雲滴が、それが含まれる雲全体の情報を示すことが分かってきた。さらに、その情報を経時的に並べて見ることで、雨雲の雲滴形成や成長の過程についての情報が得られる可能性が見えてきた。しかしながら、その支配要因や季節性などについては未解明の部分が多く、更なる採取分析を進めることで、より詳細な情報が得られることが期待される。

参考文献

- 1) M. Kasahara, S. Akashi, C.-J. Ma, and S. Tohno, *Atmos. Res.*, **2003**, 65, 251.
- 2) C.-J. Ma, S. Tohno, M. Kasahara, and S. Hayakawa, *Anal. Sci.*, **2006**, 22, 415.
- 3) K. Bächmann, I. Haag, T. Prokop, A. Röder, and P. Wagner, *J. Chromatogr. A*, **1993**, 643, 181.
- 4) A. Röder and K. Bächmann, *J. Chromatogr. A*, **1995**, 689, 305.
- 5) B. Tenberken, P. Ebert, M. Hartmann, M. Kiber, A. Mainka, T. Prokop, A. Röder, and K. Bächmann, *J. Chromatogr. A*, **1996**, 745, 209.
- 6) B. Tenberken and K. Bächmann, *J. Chromatogr. A*, **1997**, 775, 372.
- 7) N. Tomikawa, B. Nanzai, and M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2011**, 27, 861.
- 8) B. Nanzai, Y. Goto, Y. Ishida, and M. Igawa, *Anal. Sci.*, **2019**, 35, 1263.
- 9) J. Warner, *J. Atmos. Sci.*, **1969**, 26, 1272.
- 10) J. W. Fitzgerald and P. A. Spyers-Duran, *J. Appl. Meteorol.*, **1973**, 12, 511.
- 11) N. L. Miles, J. Verlinde, and E. E. Clothiaux, *J. Atmos. Sci.*, **2000**, 57, 295.

富士山における大気電気・雷研究：2022年夏期の成果

鴨川仁¹, 大気電気・雷研究チーム
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2022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、4) についての電場測定の結果のみにふれる。

については本稿ではふれない。

2. 雷放電位置評定観測

Blitzortung.org (以下Blitzortung) は、到着時刻法 (TOA) に基づいて、VLF帯電波受信機で大気中の雷放電の位置検出するためのネットワークである。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、完成品の販売はしておらず部品代となるが一式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、位置評定を行う。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

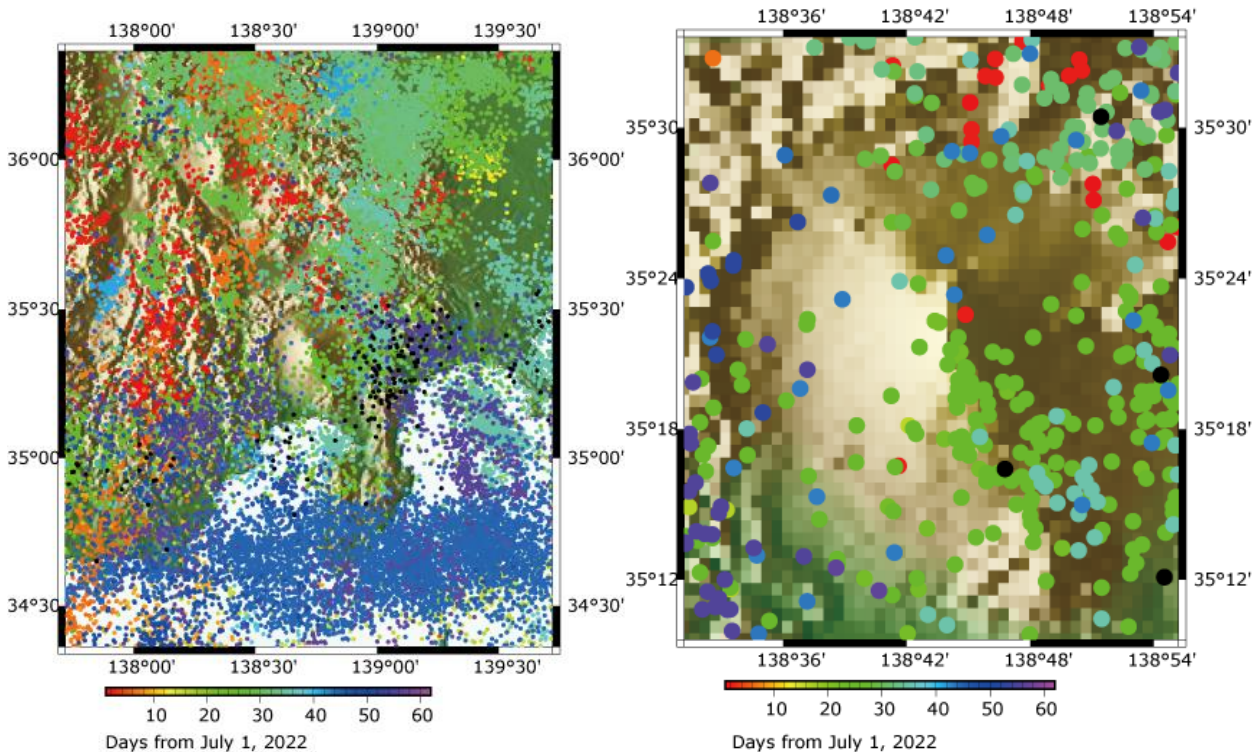


図1 Blitzortung.org によって検知された雷放電。左は富士山周辺、右は、富士山範囲内。

1) については本講演集の安本ら、2) についてはSmithら、3) については鈴木らの原稿を参照されたい。なお5) 及び6) には山頂、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。

連絡先：鴨川仁 (Masashi KAMOGAWA) kamogawa@u-shizuoka-ken.ac.jp

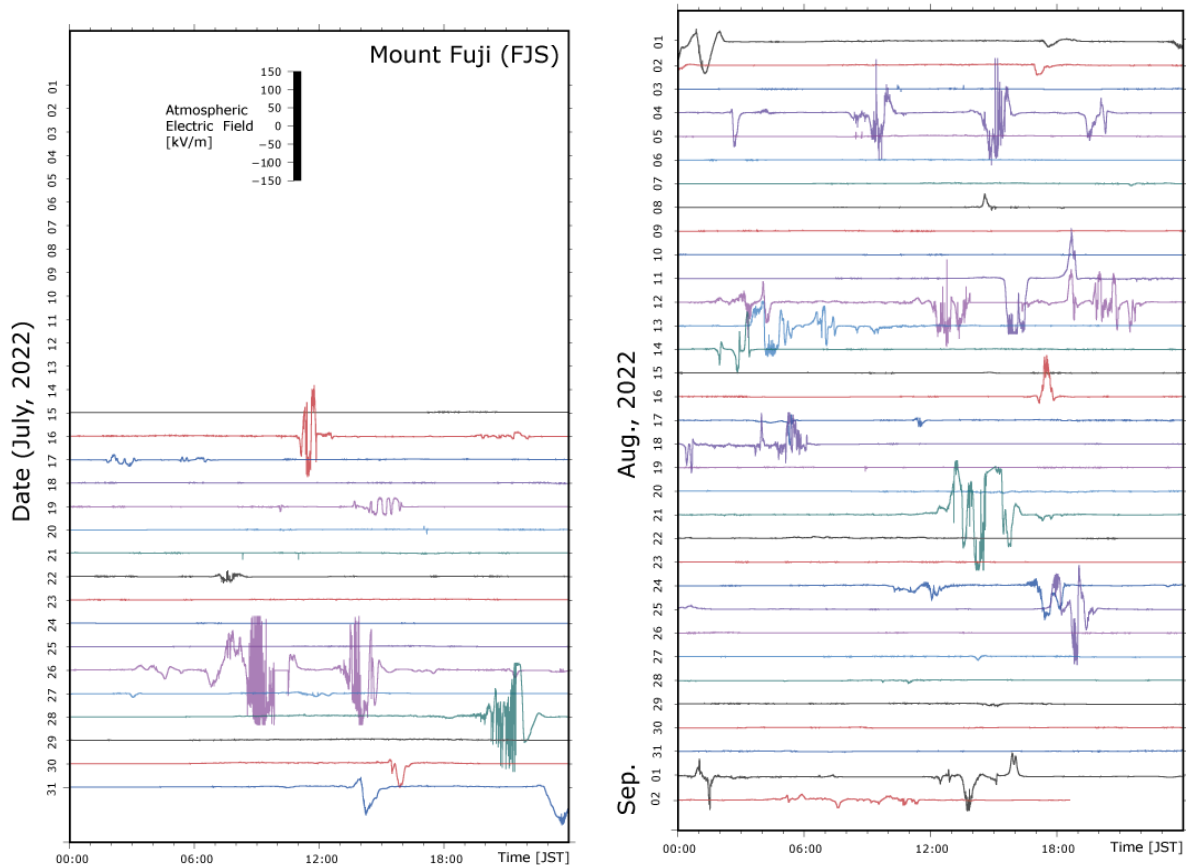


図2 2022年夏期観測中のフィールドミルの時系列データ

2022年については夏期間、富士山周辺では図1のような結果が得られた。2022年の特徴としては、山頂周辺に落雷が多かったのが過去15年にない特徴だったといえる。

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評定機器を用いるが、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 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、計測飽和を起すことなくこの問題に対応するには、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。2022年は動作確認をするために図2に示されるように、欠測も少なく動作が良好であることも確認できた。

富士山頂の雷測定で見える雷現象

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 土器屋由紀子¹, 鈴木智幸², 村田浩太郎⁴

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.埼玉県環境科学国際センター

1. はじめに

接地線電流測定を始めた切っ掛けは、雷対策のため、接地系統の接続状態を調査したとき、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年夏の観測から接地線電流の測定を始めた。

この時、直撃雷は観測されませんでした。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、周辺雷現象による接地線電流測定も行っている。2015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。2017年の観測では回路、及びトリガーのオフセット対策により高感度測定が可能にできステップリーダが観測できた。2019年はステップとリーダとそれに続くリターンストロークの全体像の測定が可能になるように測定時間を長くする改良を加えた。この改良で、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。

2021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。2022年は、直撃雷大電流測定系でリーダと多重落雷が複数観測された。

測定系の改良を進めたことで富士山の雷現象が見えるようになってきている。本報告は測定から見える富士山の雷現象の特徴、及び今後の測定で改良すべき点について報告する。

2. 雷現象観測装置の構成

雷現象による接地線電流測定は、富士山体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。

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蔵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も繋がっていることになるため、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きている。

また、測候所は3776m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る。

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することで得ている。ちなみに高压ケーブルには電源電流も流れるが、電源

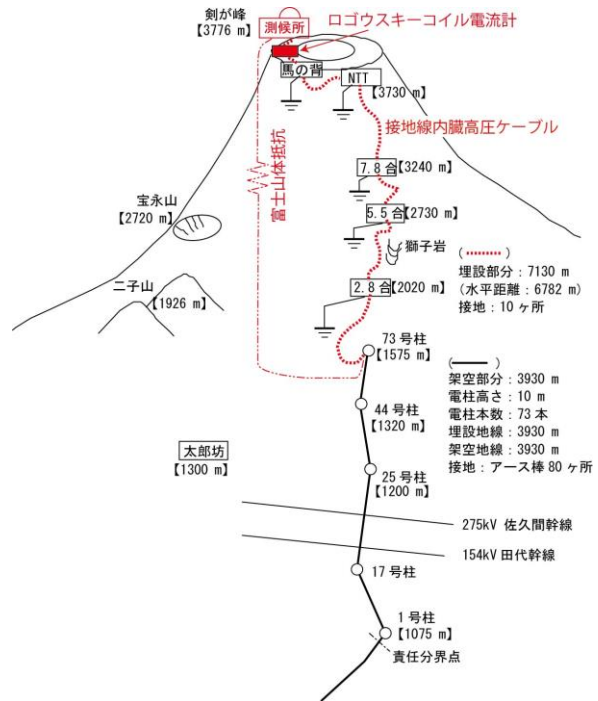


図1 富士山体測定系の構成

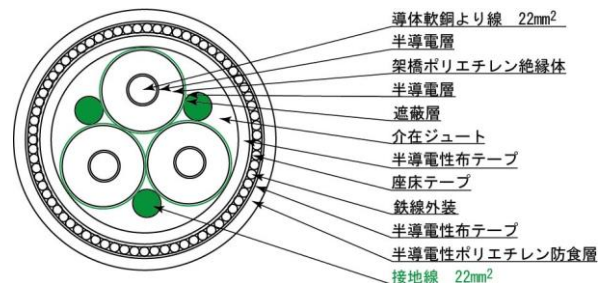
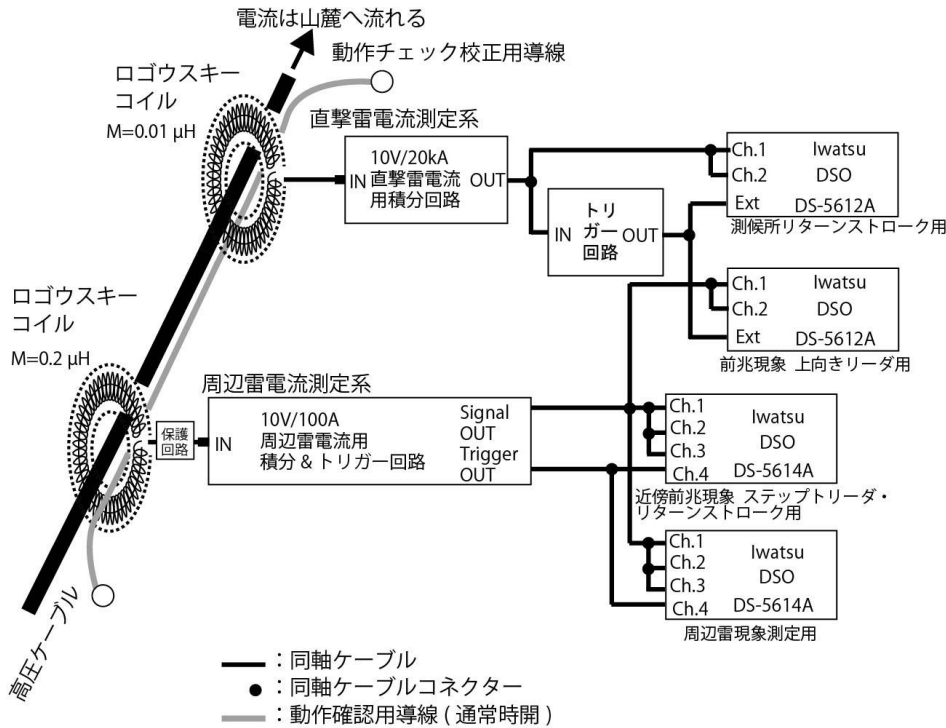


図2 富士山測候所引き込み高压ケーブルの構成

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、高压系統の絶縁を確保することで高压ケーブルのみの測定で実現している。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3が測定系全体を示している。

3. 接地線に電流を流す雷現象

富士山地上接地線に電流を流す雷現象は、観測から図4に示す五つあることが分かっている。



DSO 測定条件

水平軸
M Pos.: 0, 100 μs/div. 1kpts.

垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (4kA/div.)
Ch.2: AC 200 mV/div. (400A/div.)
Trigger: エッジ, Ext10, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 100 mV (0.2kA)

水平軸
M Pos.: +250ms, 100 ms/div. 1Mpts.

垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (20A/div.)
Ch.2: AC 200 mV/div. (2A/div.)
Trigger: エッジ, Ext10, 立上がり, ノーマル, AC, トリガーレベル 100 mV (0.2kA)

水平軸
M Pos.: 0, 10 ms/div. 100kpts.

垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (20A/div.)
Ch.2: AC 500 mV/div. (5A/div.)
Ch.3: AC 100mV/div. (1A/div.)
Ch.4: トリガーモニター
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)

水平軸
M Pos.: 0, 200 μs/div. 1kpts.

垂直軸
Ch.1: AC 2 V/div. (20A/div.)
Ch.2: AC 1 V/div. (10A/div.)
Ch.3: AC 500mV/div. (5A/div.)
Ch.4: トリガーモニター
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3 接地線に流れる電流測定系の雷現象による測定条件

観測できる対地雷には三つある。一つ目が直撃雷電流である。二つ目が測候所電極捕集電流である。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富士山体抵抗の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、四つ目に雷電流による電磁誘導電流、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。

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、電流を積分した値が落雷電流に比例したものになる。

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。

本観測装置は、これらの複数現象を同時に捉えることが可能になっている。このことによりより正確な現象解明が可能になっている。

図3はこの測定を実現している測定系の全景である。

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。

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

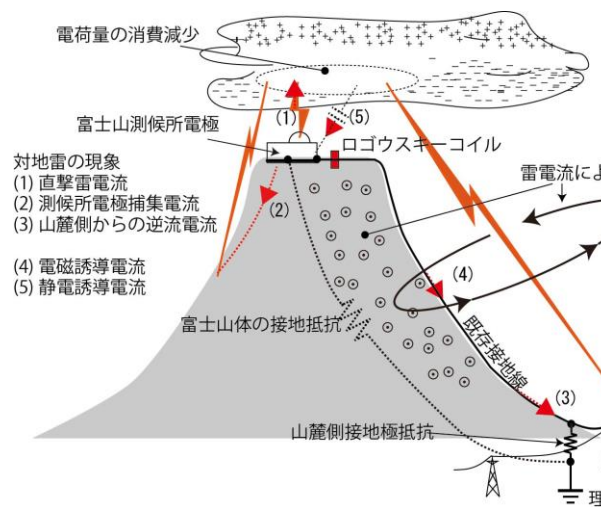


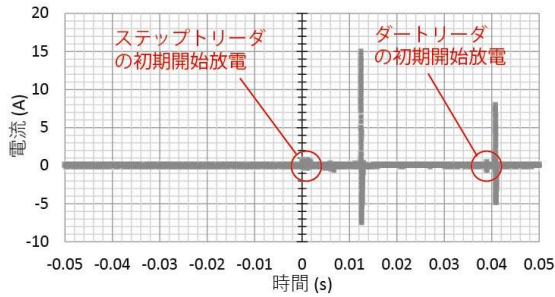
図4 富士山周辺落雷時に測候所と山麓接地極を繋ぐ接地線に流れる電流

流を捉えるようになっている。

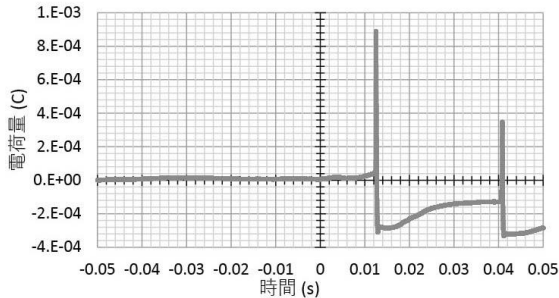
DSO-3は近傍の前兆現象、ステップリーダ・リターンストローク測定用である。また多重落雷の測定も可能である。トリガーレベルは0.5Aとしている。

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可能である。

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。

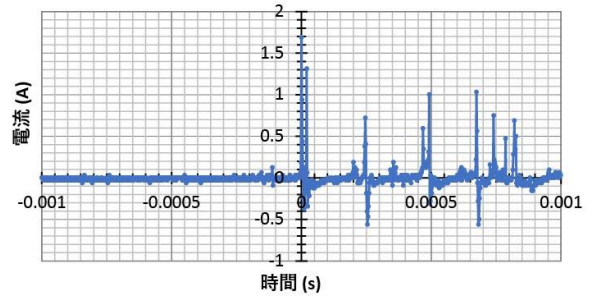


(a) 接地線電流測定波形

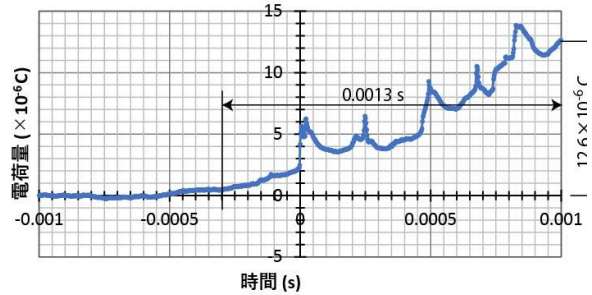


(b) 接地線電流の積分値

図5 2019年7月23日01:23:50に観測された二重落雷



(a) 接地線電流



(b) 接地線電流の積分値

図7 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)

4. 観測結果から見える雷現象

4.1 ステップリーダの初期開始放電

図5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。停車時に測定されているため、零相電流の影響は見られない。

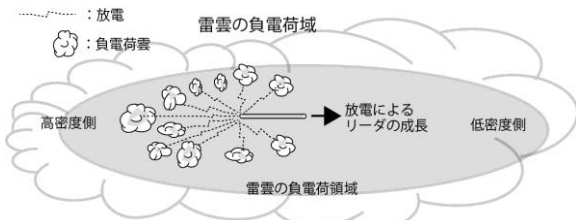


図6 ステップリーダの初期開始放電のモデル

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40msである。この間放電路のイオン・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リーダが観測されている。また両波形のステップリーダとダートリーダの初期開始放電が観測された。前兆現象初期のノイズ状パルスの原因は、放電路進展前のランダムな放電によるものと推測される。

リーダが発生する前、放電が頻発し、リーダができ一方で放電が伸びていき、もう一方は電荷密度が高く放電でリーダに電荷を集める。図6はこの状況を図式化したものである。

4.2 ステップリーダの進展

図7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

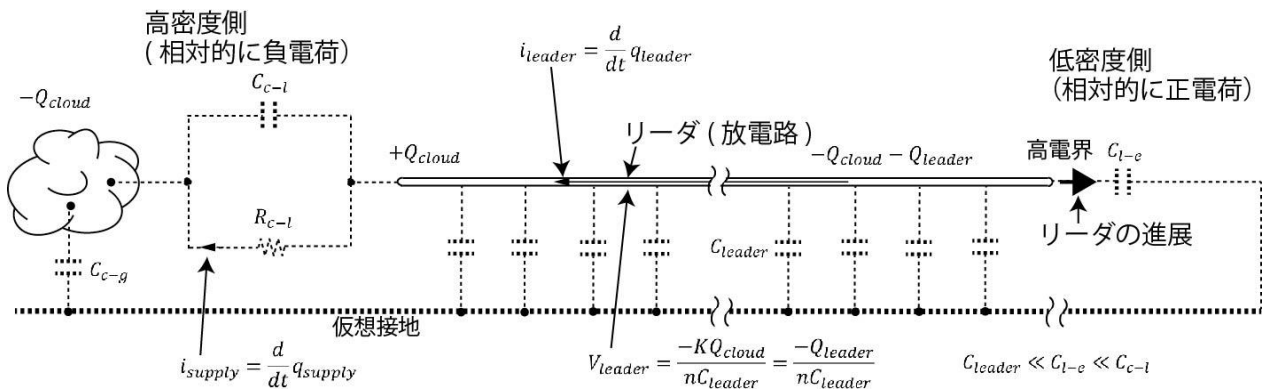


図8 負極性下向き雷のステップリーダの単純化モデルの等価回路

定している。ステップリーダによる電流は電磁誘導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の進展で流れる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8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。

4.3 多重落雷

こ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放電路が生じていて、それがダートリーダ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5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

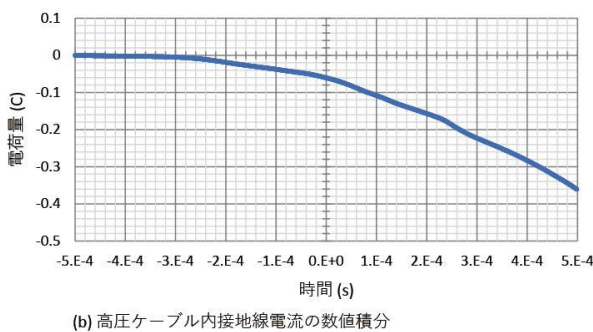
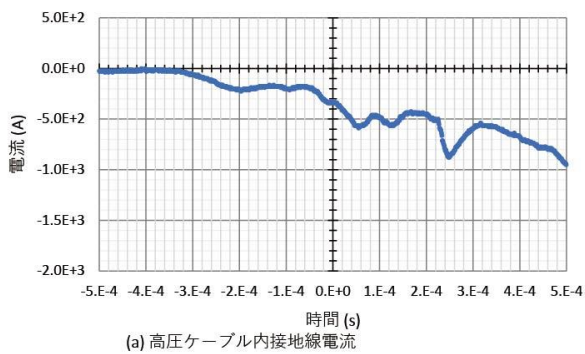
が無い分短くなっていると考えられる。

2021年8月18日に図9の二重落雷の測候所直撃雷が観測された。左の図が第1雷撃、右の図が第2雷撃である。上が観測された高压ケーブル内接地線電流である。下がその数値積分波形で電荷量になる。いずれも高压ケーブル内接地線に流れる電流で、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倍したものになり、電荷量も2倍したものになる。

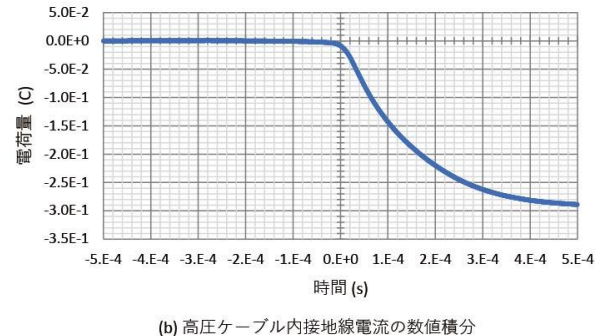
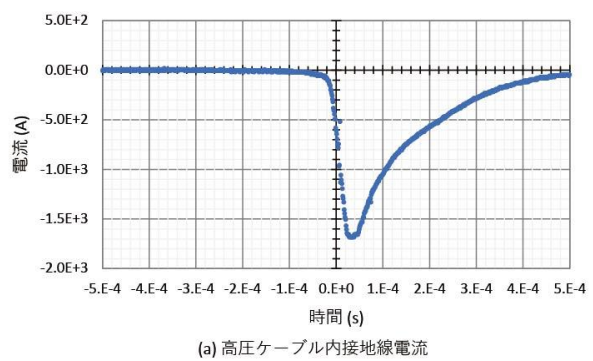
第1雷撃には、前兆現象が見られず、大電流の上向きリーダの可能性が高い。測定電流は測定時間には収まっておらず、測定範囲だけでも第2雷撃よりも大きな電荷量の落雷である。大きなリーダは他の観測でも見られることから富士山のように単独峰で雷雲が近く、大きな気流変化が伴うことによる高電界が生じる富士山特有の現象の可能性があると考えている。第2雷撃は第1雷撃の放電路をダートリーダとしたリターンストロークと考えている。

測候所周辺の下向き雷、上向き雷進展の特徴は以下のようにになる。下向き雷は測候所周辺の電界により進展方向は決まり、必ずしも測候所被雷とはならない。他方、上向き雷は電荷補給が得られる測候所から連続的に進展するケースが多いと考えられる。

多重落雷は、下向き雷の避雷箇所が測候所以外の岩盤である場合、大地側からの電荷補給は十分でなく多重雷が生じにくいと考えられ、他方、測候所の場合、山麓接地極から電荷

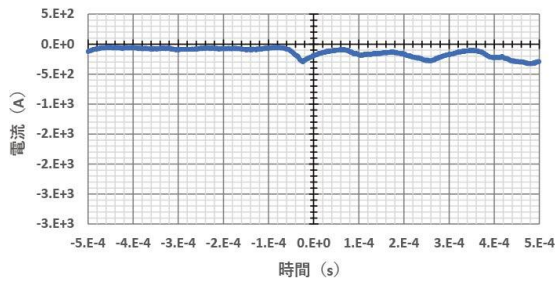


(1) 測候所の第1雷撃 (at 10:46:28 on August 18, 2021)

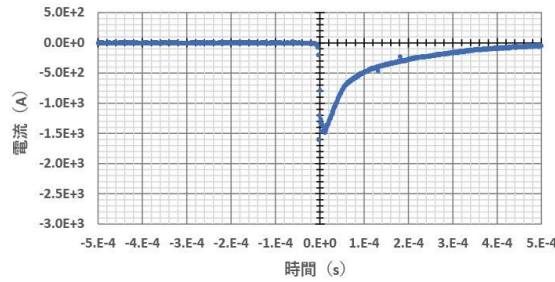


(2) 測候所の第2雷撃 (at 10:46:29 on August 18, 2021)

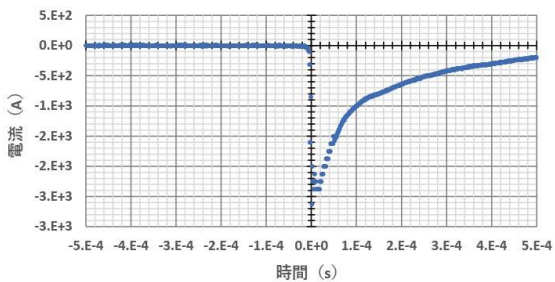
図9 負極性雷の大電流上向きリーダとそのリターンストローク



(a) at 07:37:40 on July 22, 2022



(b) at 07:37:40 on July 22, 2022



(c) at 07:37:40 on July 22, 2022

図10 負極性上向き二重落雷

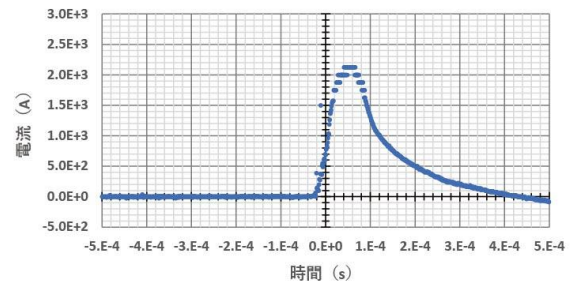
補給があることで多重落雷の条件ができやすくなっていると考えている。

上向き雷の多くが電荷補給が得られる測候所が起点になり、下向き雷の測候所直撃雷頻度は、下向きリーダの統計的な進展方向で決まると考えられる。

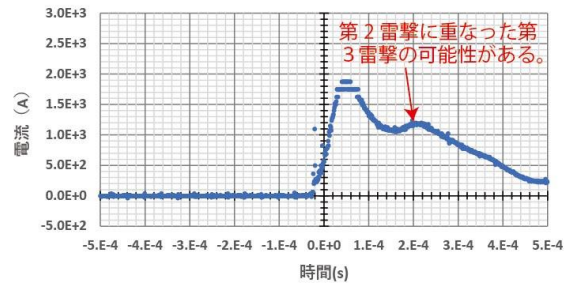
測候所からは山麓に繋がる接地線を通して連続的な電荷補給を受ける。そのため、上向き雷は測候所直撃雷になり、上向き・下向き共に測候所直撃雷はその後の多重落雷の条件を満たす場合が多くなっているのではないかと推測している。

4. 4 2022年に観測された大電流波形

2022年観測では今までにない多数の直撃雷電流が観測された。2022年7月22日にDSO-1測定系で観測された電流波形は、(1)負極性上向きの二重落雷、(2)負極性上向き雷、及び図10に示す(3)負極性上向きの二重落雷の計5個の直撃雷、7月26日には(4)負極性下向き雷、図11に示す(5)正極性下向き二重落雷、及び次の(6)正極性下向き二重落雷 計5個の直撃雷、両日で計10個の直撃雷が観測された。図11に示す正極性下向き雷の(b)の第2落雷電流波形には二つ目のコブがあるが



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



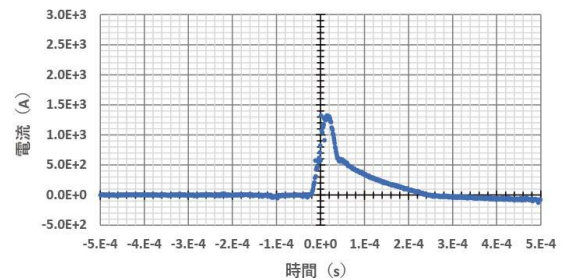
(b) at 13:46:12 on July 26, 2022

図11 正極性下向き二重落雷

第3雷撃が重なったものと考えられる。8月4日に観測された図12の雷電流は測候所電極捕集電流として捉えられた(7)正極性下向き雷の可能性が高い。

傾向として測候所直撃雷と考えられる観測波形には二重落雷が多く観測されている。測候所が低抵抗の山麓接地極に繋がっていることで、電荷補給が得られ易く雷雲電荷高密度側での多重落雷の条件ができやすくなっているのではないかと推測している。(6)の正極性下向き二重落雷は時間差を考えると第2雷撃が第3雷撃で、第2雷撃は測定系のデッドタイムで見えなくなった三重落雷の可能性もある。

(7)の正極性下向き雷は測候所周辺の落雷を測候所電極捕集電流として接地線に流れた電流を測定したものと推測している。下向きリーダによるリターンストロークで富士山体への落雷のため、その一部の電流が接地線を通ったと考えることができ



at 15:3:51 on August 4, 2022

図12 測候所電極捕集電流として捉えられた正極性下向き雷?

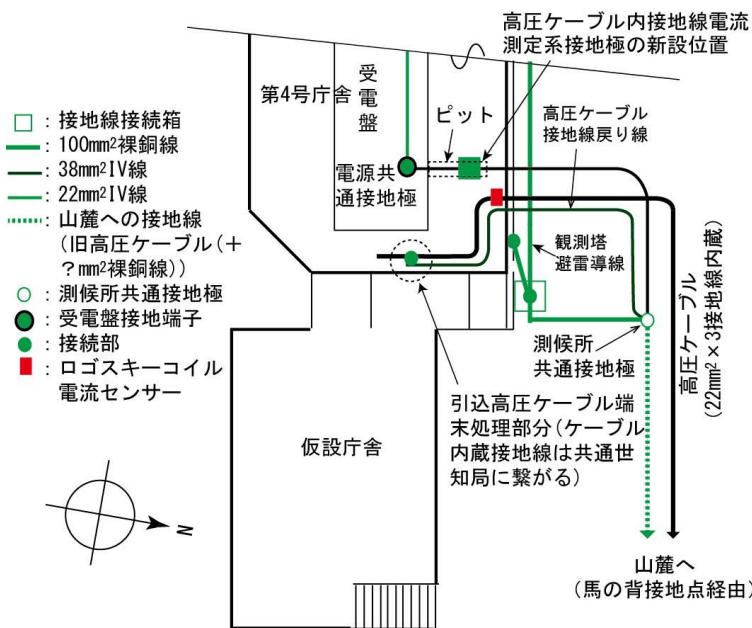


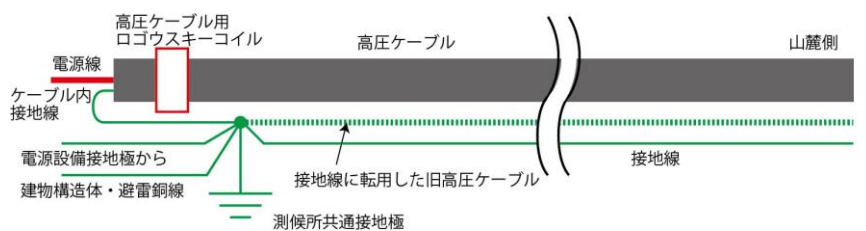
図 13 高圧ケーブル内接地線電流測定系接地極の新設位置と引込部の接地構成

るが大半が接地抵抗が大きな富士山体を経由することになるため、電荷補給は十分得られず、単発で終わったと推測している。

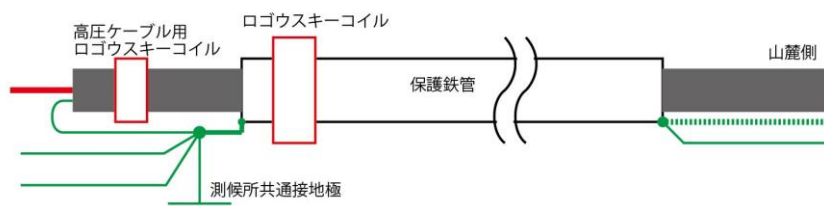
5. 測定系に必要な今後の対策

5.1 接地系統改善と埋設高圧ケーブルの露出対策

(1)接地系統の改善：現在の測定系接地は分電盤筐体を接地極に使用し一点接地としている。安定な接地電位を確保するため、図 13 のようにできるだけ測候所共通接地極に近い位置としてピット内接地線に測定系接地極を確保しこの接地極に測定系接地を一点接地し安定な電位を確保することが好ましい。



(a) 測候所の山麓側既存接地線構成とログウスキーコイル



(b) 高圧ケーブル修繕後の山麓側接地線構成とログウスキーコイル

図 14 高圧ケーブル露出対策修繕方法

(2)埋設高圧ケーブルの露出対策：雷現象による接地線電流測定は、現在高圧ケーブル内臓接地線のための電流を測定している。しかし、山麓接地極に繋がる接地線は、図 13 に示すように高圧ケーブル内臓の接地線だけでなく旧高圧ケーブルを接地線に転用したもの、および接地線の三つがあり、これら全接地線電流を測定しているわけではない。

富士山測候所に引き込んである埋設高圧ケーブル露出に対応する修繕工事（馬の背ハット～旧測候所内）が必要になっている。この時、この保護区間について全接地線電流測定を可能にするため保護鉄管を従来の接地線の代わりにすることで、保護鉄管にログウスキーコイルを設けることで全接地線電流に流れる電流の測定が可能になる。現在は高圧ケーブルの接地線電流のみを測定することになるため、全接地線電流測定は校正して求め

ることになる。

高圧埋設ケーブル露出対策を機会に、全接地線電流も測定可能にする改良工事を実施することが好ましい。

現在、測候所の共通接地極は撤去済の旧燃料タンクの西北角の位置付近にある。この共通接地極の位置を 4 号庁舎内に変更し、全接地線電流測定が可能になる導電性保護管内に高圧ケーブルを収め、他の接地線は保護鉄管にすることで、旧高圧ケーブル、および接地線の代わりになる。保護鉄管の位置でログウスキーコイルを設置し電流測定することにより全接地線電流を求めることができる。

高圧ケーブルの導電性保護管も共通接地極に接続することで全接地線電流を求めることができる。

配線ルート変更により山麓に繋がる全接地線電流測定は原理上しやすくなるが現実的には導電性保護管は大きくできず、コンパクト化を考えると現在の併設接地線（旧高圧ケーブルと銅線）は導電性保護管で代用できるようにすることが必要になる。

測定への影響を避けるため、零相電流の影響は小さくする必要がある。そのため、高圧系統の絶縁はできるだけ大きなものにして漏れ電流を小さくする必

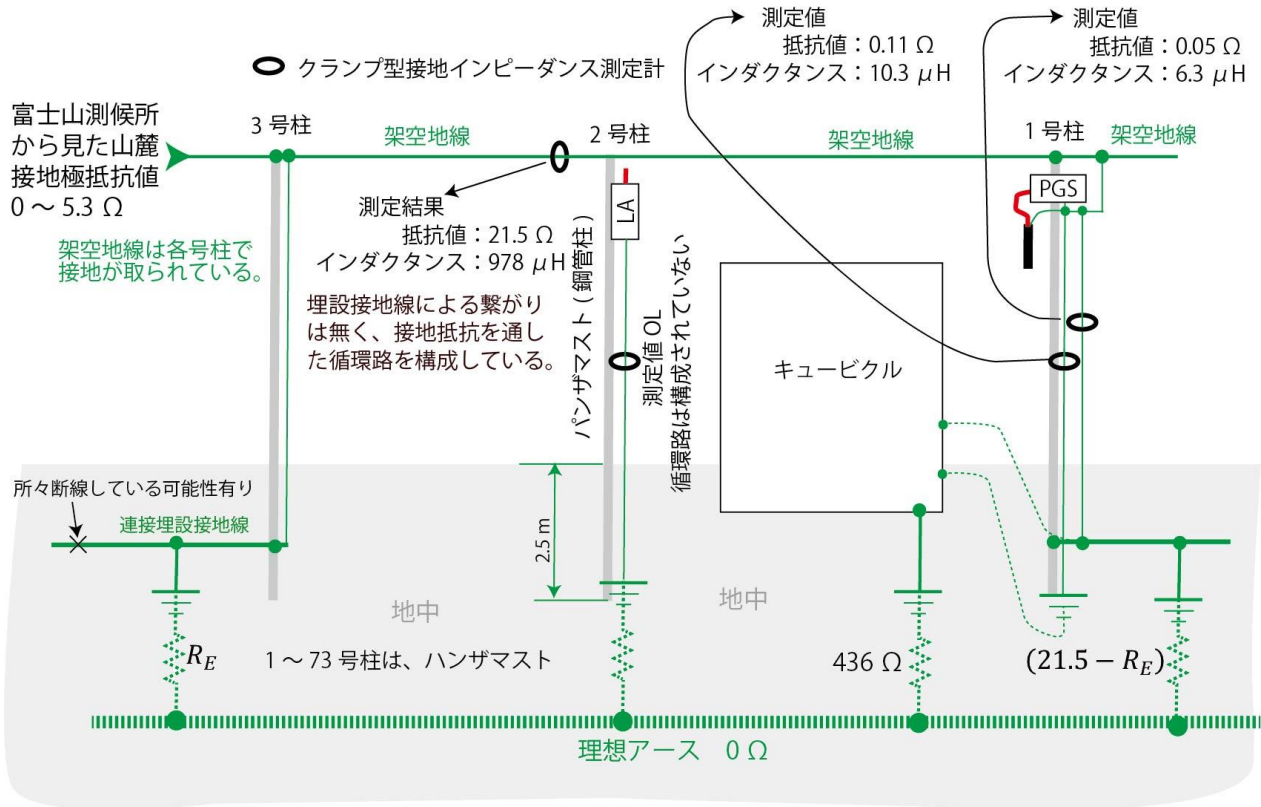


図 15 測定で得られた責任分界点接地抵抗の等価回路

○ ○ : クランプ型接地インピーダンス測定計

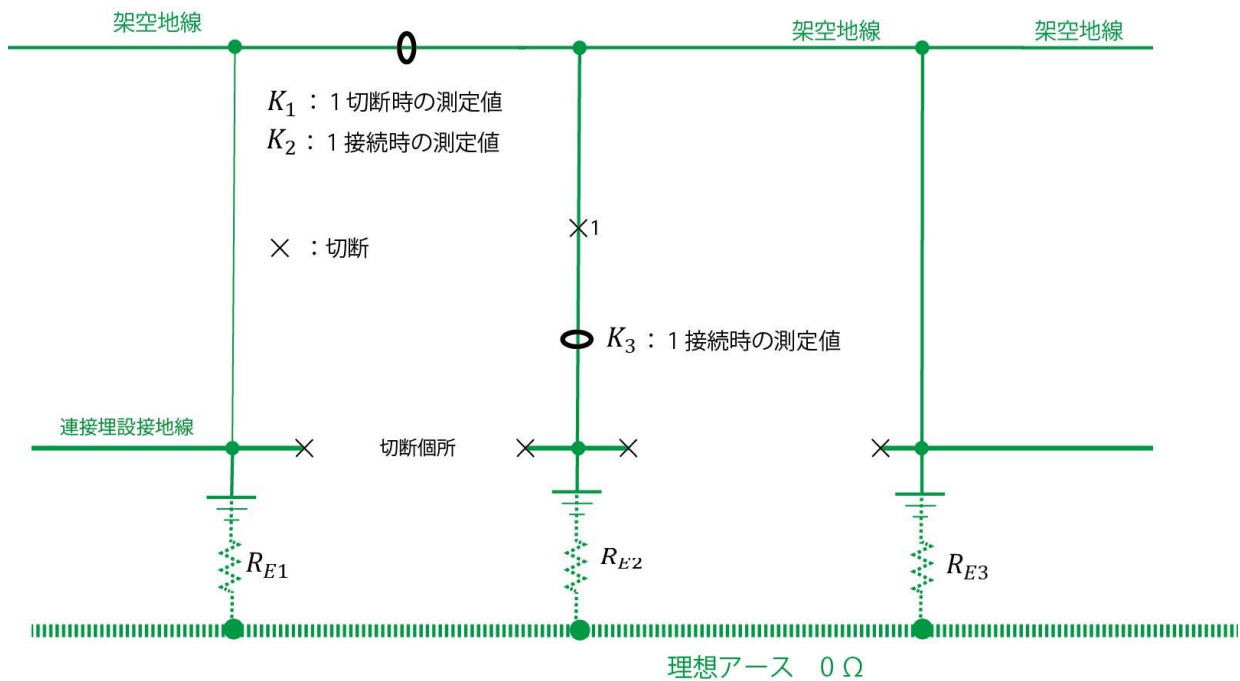


図 16 三極法による接地抵抗測定を可能にする等価回路の条件

要もある。

現在有力な校正手段は測候所直撃雷電流をシャントに

より絶対測定して高圧ケーブル内接地線測定電流との比
を取ることで可能になるが、そのための仮設避雷針を実

現できず実質出来ない状況である。

なお全接地線電流が測定可能になっても測候所から山体に流れる電流があり、この補正のためにも直撃雷電流を測定する必要がある。しかし、この電流は小さいと考えており、大半が接地線に流れると推測している。

周波数成分の高い電流の分流は、接地線特性インピーダンスと富士山体の特性インピーダンスに支配されるため、抵抗値とは別にこの評価方法を確立することが必要である。

5.2 山麓接地極の抵抗値評価

雷現象解明のため、接地抵抗評価は必要である。この抵抗は一定でなく変動を伴うため、定期的な測定が必要である。

(1)責任分界点における接地抵抗：山麓側の接地極抵抗を知る必要があり、観測前の点検に合わせて、架空送電線責任分界点の山麓側接地抵抗を測定した。山麓責任分界点の1号柱接地極接地抵抗は測定により、埋設地線は送電側と受電側で接続されていないことがわかり、図15の等価回路であることがわかった。この等価回路により受電側架空地線から見た接地抵抗 R_{ET} は以下の式になる。

$$R_{ET} = \frac{R_E(21.5 - R_E)}{R_E + (21.5 - R_E)}$$

最大値は次式を満足する値になる。

$$\frac{d}{dR_E} R_{ET} = 0 = 1 - \frac{2R_E}{21.5}$$

この値は、 $R_E = 10.75 \Omega$ になる。従って、この最大の R_{ET} は 5.4Ω で、 R_{ET} は 5.4Ω 以下になる。

(2)山麓側高圧ケーブル立ち下げ部分接地極接地抵抗：測候所に電力を供給する高圧ケーブルの架空送電線立ち下げ部分の71~73号柱、また架空送電側の接地抵抗は次年度測定予定である。もし接地極が三つに分離でき、図16の等価回路が実現できるならば、三接地極の接地抵抗測定は可能である。例えば、クランプ型接地インピーダンス測定計で第2接地極の1で切断時の測定値を K_1 とし、接続時の測定値を K_2 、1で接続時の第2接地極接地線での測定値を K_3 とすることで以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} K_1 &= R_{E1} + R_{E3} \\ K_2 &= R_{E1} + \frac{R_{E2}R_{E3}}{R_{E2} + R_{E3}} \\ K_3 &= R_{E2} + \frac{R_{E1}R_{E3}}{R_{E1} + R_{E3}} \end{aligned}$$

この連立方程式を解いて、 R_{E1} 、 R_{E2} 、 R_{E3} それぞれは以下の値になる。

$$R_{E1} = K_1 - \sqrt{K_1 K_3} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - 1}$$

$$R_{E2} = \frac{K_1 K_3}{K_2} - \sqrt{K_1 K_3} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - 1}$$

$$R_{E3} = \sqrt{K_1 K_3} \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - 1}$$

なお以上の接地抵抗の現場調査の折、高圧ケーブルにロゴウスキーコイルを設置可能であり山麓側での高圧ケーブル内接地線電流測定は可能であることも分かった。

5.3 測定系の設置と問題点

(1)組立後の動作確認：事務局で測定系を組立調整し、分解して測候所に搬入して組立を行い測定できるようにする。調整後組立使用するまで長時間電源は OFF になり、ブルドーザで測候所運搬時に振動も伴うため DSO 使用後の測定条件が保存されない場合がある。組み立てた後に正常に動作するかチェック用テストサージ電流を流して確認する必要がある。

確認方法は、以下の方法で確認する。

- ①測定系の DSO の表示灯の点灯状態が正常であることを確認する。
- ②テストサージ電流を流し、動作することを確認する。
- ③表示灯の点灯状態が変わらず正常状態であることを確認する。
- ③テストサージ電流を流し、2回目も動作することを確認する。

DSO のディスプレイ上部中央のアイコンが「STOP」のとき測定条件の「呼び出し」操作を行う必要がある。「Ready」であれば問題ない。

短期間の停電であれば問題なく保存されている。

(2)停電対策：電源は、停電時、自家発電に切り換えて使用するようになっている。切り換え時間の短時間（7分以下）は UPS を用いて停電しないようになっているが今までの使用状況では十分でなく停電してしまう場合もある。大きな容量の UPS にする必要がある。

DSO は停電すると停電前の状態が保存されるが、本来の使用方法でなく、できない場合がある。停電回復後のディスプレイの表示が正常な動作状態でない場合、この時は内部メモリーからの「呼び出し」を行い正常な動作になるようにする必要がある。

(3)循環電流対策：接地系統に循環路ができないように注意する必要がある。接地系統の循環路の抵抗は小さく小さな電圧源で大きな循環電流が流れてしまう。循環電流が流れると高感度ロゴウスキーコイルで検出してしまう。

循環電流源にならないように接地は切り離し、循環路を作らない安定な電位が確保できる接地構成にする必要がある。

(4)オフセットの調節方法：調整位置から DSO-3（あるいは DSO-4）の画面が鏡に入るように鏡の位置を調整する。

DSO の TRIGGER の「AUTO」を押す。

増幅回路の上蓋を開ける。

増幅回路のオフセット調節用トリマー抵抗を調節しオフセットをゼロに調節をする。

内部メモリーから「呼び出し」を押し測定状態にする。

(5)時刻校正：今までの DSO の時刻校正は、測候所に持ち込む前に時刻校正をし、使用後に DSO の時刻校正行い内挿補正をしていた。しかし、DSO に使用している水晶振動子の温度係数による時刻変化は無視できず、他の測定との比較するため、できるだけ正確な時刻校正が必要である。その方法として、GPS 補正による時刻校正は必要である。GPS で補正したカメラあるいは iPhone で DSO の時刻表示を撮影することで DSO 時刻と GPS を対応付けでき時刻校正をすることができる。

6. おわりに

富士山体を雷現象測定系にすることで、雷現象で生じる接地線電流の五つの特徴を明らかにした。

雷現象による電流変化の特徴を同時測定できることで雷現象を正確に捉えることができるようになった。

測定から見える富士山の落雷の特徴、直撃雷、多重雷、及びリーダの特徴を明らかにした。

雷雲が近くなるため、大きな高電界が生じ、大きな電流の上向きリーダ放電路になる場合が多いと推測される。富士山特有の雷現象の可能性が高い。

富士山での観測を積み重ねることで、さらに富士山の雷現象の特徴を正確に知ることができ、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。

7. 謝辞

資料や情報提供等で調査にご協力頂いた東京管区気象台の各氏、雷観測にご協力頂いた NPO 法人富士山測候所を活用する会の岩崎洋、大胡田智寿、山頂班および事務局員の方々、さらに DSO 使用でご支援いただいた岩通計測、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) 安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 土器屋由紀子 (2021). 富士山雷観測によるリーダの進展モデル, 第 14 回富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 26-30.
- 17) 安本 勝・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
- 18) 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
- 19) .安本勝, 鴨川仁, 佐々木一哉, 伊高健治,, 鈴木智幸, 林真彦, 器屋由紀子 (2022). 富士山体を検出器とした 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.
- 20) 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
- 21) 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

富士山で観測された地球ガンマ線フラッシュ

David M. Smith¹, 鴨川仁², J. Ortberg¹, J. Chaffin³, 王道洪⁴, Ting Wu⁴, 鈴木智幸²

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, 3. Air Force Institute of Technology, 4. 岐阜大学

1. はじめに

地球ガンマ線フラッシュ(TGF)は、ごく一部の稲妻に付随するミリ秒以下のガンマ線のバーストである。NASAのコンプトンガンマ線観測のBATSE (Burst and Transient Source Experiment)装置によって発見された¹⁾。現在でも、我々が知っているTGFのほとんどは、人工衛星から観測されている。なぜなら、衛星は一度に100万km²までの地球表面を観測することができるからである。軌道上の発生源から600 kmの距離でも、TGFはガンマ線検出器の計数能力を飽和させ、その強度を発生源まで外挿すると、放射線が発生する事象のちょうど中心部にいる人に大きな健康リスクがあると予測される^{2),3)}。

しかし、これまでに様々な衛星から観測された何千ものTGFは、ほぼ全て上向きリーダーの雲放電によるもので、ガンマ線が十分に宇宙に出て行きにくい高度8~10km未満でTGFがいつ、どのくらいの頻度で発生するかについては何もわかっておらず、加速電子と制動ガンマ線が地上に向かって下降するTGFについては何もわかっていない。米国フロリダでの最初の発見⁴⁾を皮切りに、いくつかの下向きTGFが様々な地点で観測されている。近年、地上からのTGF検出では日本が世界最大の拠点となっている⁵⁻⁸⁾。これらの事象は、北陸地方沿岸の強力な冬季雷の際に検出された。

ここでは、日本で初めて夏期に観測されたTGFを報告する。また、スイスのサンティス山で発見された3つのTGF⁹⁾と共に、孤立した山の気象環境で見られた最初のTGFでもある。最後に、以後の3つのイベントのうち2つは、下降するステップリーダーのステップに伴う、弱いX線のバーストが先行していた。この種のステップリーダーX線バーストは負極性落雷のステップリーダーで何度も報告されている^{10,11)}。このX線のエネルギーはTGF光子より1桁低く、加速される電子の数はTGFパルスより4-5桁低い傾向がある。ステップリーダーが高エネルギー電子を十分に高い背景電場に射出すると、電子はさらなる逃走加速を起こし、スペクトル的にはTGFに似ているが、より短いバーストで低輝度で放射される事象が発生することがある¹²⁾。

2. 観測

ガンマ線検出器システムは、直近では2022年の夏のキャンペーンで、4回にわたって富士山頂に配備された。北陸の冬季雷と同じように、夏の富士山では、雲の高電場領域が地表から2 km程度以内であり、介在する空気によるガンマ線の吸収を最小限に抑えることができる。2022年は、カリフォルニア

大学サンタクルーズ校で開発されたGODOT (for Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms) と THOR (Terrestrial High-energy Observations of Radiation) という2つの検出器システムを用意した。GODOTの方が古いシステムで(日本には2015年に初稼働)、THORは2022年が初年度であり、いくつかの改良が加えられている。

2022年は初めてTGFを3回観測した。これらは「コンパクトリターンストローク」と呼ばれる、地面から2 km以内に発生する雲から地面への負極製対地雷で、一般的に非常に強力なリターンストロークを有していた¹³⁾。

FALMA 呼ばれる LF 帯電波観測アレイのデータ¹⁴⁾を用いて、冬季雷におけるコンパクトなリターンストロークと TGF の関連付けが行われている¹⁵⁾。

3. 結果

図1から図3は、FALMAによるLFの電界波形と、THORの3つの検出器(体積3350 cm³(大型プラスチック, LPL), 261 cm³(中型プラスチック, MPL), 6.5 cm³(小型プラスチック, SPL))のガンマ線データとの関係を示しています。各三角形のシンボルは、記録された1つのカウントを表し、それは1つの光子であることもあれば、互いに300 ns未満で発生した、より多くの光子を表すこともあります。THORはこのように検出器の体積に幅を持たせているため、大きな検出器ではカウント数が多いためにデッドタイムやパイルアップの影響が大きくなる場合でも、小さな検出器ならそれほど歪むことなく観測することができる。将来の論文では、3つの検出器すべてのデータを使って、検出器に入射する放射線の真の時間プロファイルを推測する予定である。このモードでは、光電子増倍管の出力電流(トレース)を80 MHzでデジタル化し、事象の約300 μsを記録している。このデータモードは、我々が見ている事象が、電磁波ノイズによって引き起こされたのではなく、シンチレータからの光のバーストとして正しいパルス形状を持っていることを保証し、放射線のカウントレートの履歴とエネルギースペクトルをよりよく拘束するために使用することができる。このモードについては、将来の論文で紹介し、分析する予定である。

図1から図3では、FALMAの波形はコンパクトなリターンストロークの典型的な挙動を示している。ステップリーダーの典型的な信号が数百マイクロ秒続き、その後強力なリターンストロークが続く。図3のステップリーダーの振幅はかなり小さく、この事象ではステップに関連するX線は見られず、TGFパルスもかなり弱く、小型プラスチック検出器ではほとんど

ど応答がない。しかし、FALMA のアレイ観測点は北陸地方にあるため富士山からは数百キロ離れており、富士山付近で起きた事象は、FALMA のどの観測点もほぼ同じ距離にあり、電磁波においては抑制されたステップリーダーであったということが物理的にも重要であるがわかる。

図1 から図3 における各図の下の3つの図は、それぞれ THOR 内の大型、中型、小型ガンマ線検出器(LPL, MPL, SPL)のデータを示している。TGFの間、2つの大型検出器は多かれ少なかれ圧倒され、小型検出器だけが最後の2ステップを偏りなく見ることができる。しかし、大型検出器だけがステップの間の X 線を検出するのに十分な大きさを持っている。大型検出器(LPL)でのリターンストロークのよく後のカウントの散布は、検出器と近隣の物質で捕獲される中性子によって生成され、ガンマ線とベータ線をもたらす⁸⁾。時間遅れは、(非相対論的)中性子が大気中を移動・散乱し、検出器に到達するまでの時間に由来する。

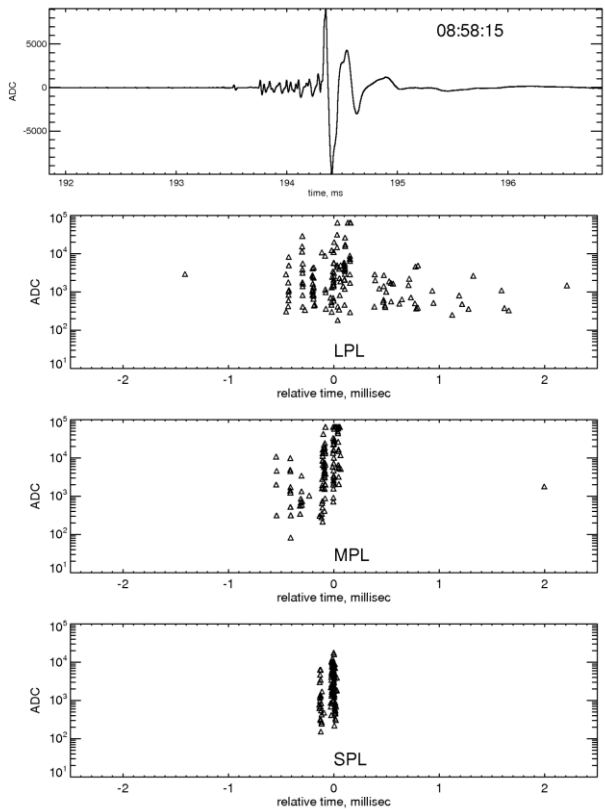


図1 2022年7月26日に富士山頂で観測されたステップリーダーX線/TGF複合イベントのVLF電波信号とX線時間/エネルギー散布図(時刻は日本時間)。

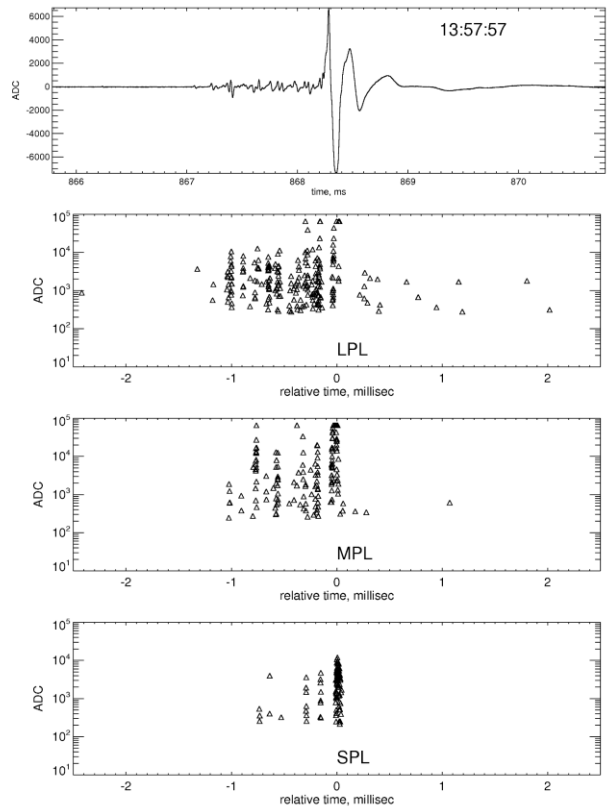


図2 TGF に至るまでのリーダーステップを示す 2 回目のイベント。

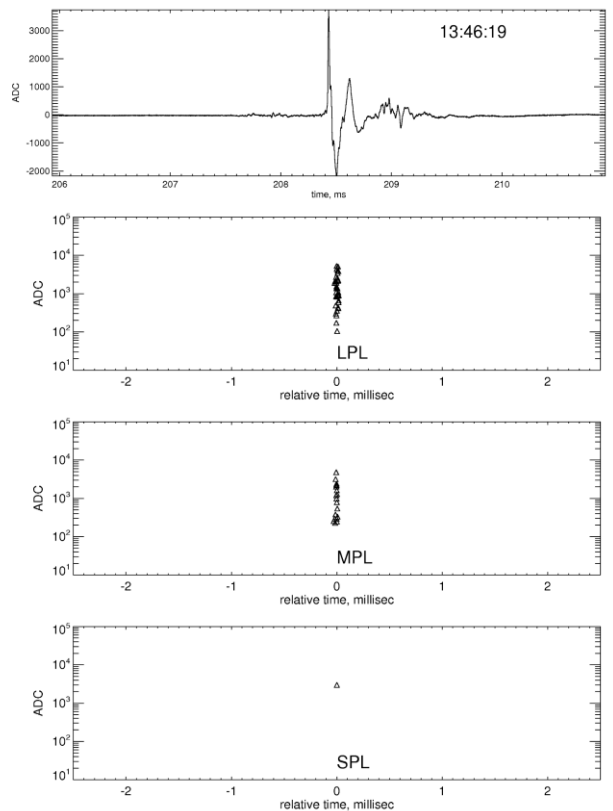


図3 2022年7月26日のコンパクトなリターンストロークに伴う別のTGF。TGFはずっと弱く、その後の中性子も見られない。段差は電波でより弱く、段差のあるX線は見えない。

図1の上段は、100km以上離れたFALMAが検出した電波信号で、一連の小さなパルスは、地上に近づくリーダーのステップを表し、最大の信号は、リターンストロークの電流によって引き起こされるものである。下の3つの図は、THORに搭載された3つの放射線検出器によるX線・ガンマ線の検出結果を示している。高エネルギー光子のエネルギーは縦軸の点で示され、横軸は時間であり、最初のパネルの電波データと同じスケールである。ステップに付随する弱い光子のバーストが見えますが、最も明るいもの(TGF)は、最後のリターンストロークの近くで起こっていることがわかる。TGFのガンマ線は、空気分子の原子核に衝突して電子を放出する。約9 MeV以上のエネルギーのガンマ線だけが空気との衝突時に中性子を生成するので、中性子の存在は、TGFのエネルギースペクトルがX線ステップリーダーの低エネルギースペクトル¹¹⁾よりもTGFの相対論的逃走スペクトル¹⁶⁾の典型であることを確認している。

4. まとめ

今後は、TGFと大気や検出器との相互作用のシミュレーション、検出器の電子回路のシミュレーション、およびトレースモードデータの断片を使用して、各フラッシュにおけるステップと最終TGFの相対スペクトルと強度を導出する予定である。これにより、ステップリーダーとTGFが全く別の現象なのか、あるいは、ステップが地上に近づくにつれて「TGF的」(より明るく、より長く、より硬いスペクトル)になっていくのかを判断することができる。

参考文献

- 1) Fishman, J. et al. (1994), Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, *Science*, **264**, 1313-1316.
- 2) 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, D09206.
- 3) Pallu, M., Celestin, S., Trompier, F., Klerlein, M. (2021) Estimation of Radiation Doses Delivered by Terrestrial Gamma Ray Flashes Within Leader-Based Production Models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2020JD033907.
- 4) Dwyer, J. R. et al. (2004), A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05119.
- 5) Umemoto, D. et al. (2016), On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds, *Phys. Rev. E*, **93**, 021201.
- 6) Wada, Y. et al. (2019), Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 061103.
- 7) Enoto, T. et al. (2017), Photonuclear reactions triggered by lightning discharge, *Nature*, **551**, 481-484.
- 8) Bowers, G. et al. (2017), Gamma Ray Signatures of Neutrons From a Terrestrial Gamma Ray Flash, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 10,063-10,070.
- 9) Chaffin, J. et al. (2023), in progress
- 10) Moore, C. B., K. B. Eack, G. D. Aulich, and W. Rison (2001), Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2141-2144.
- 11) Dwyer, J. R. et al. (2005), X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01803.
- 12) Abbasi, R. et al. (2018), Gamma Ray Showers Observed at Ground Level in Coincidence With Downward Lightning Leaders, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 6864.
- 13) Wu, T. et al. (2021), The Strongest Negative Lightning Strokes in Winter Thunderstorms in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e95525.
- 14) Wu, T., Wang, D., and Takagi, N. (2018), Lightning Mapping With an Array of Fast Antennas, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 3698-3705.
- 15) Wada, Y. et al. (2022), Characteristics of Low-Frequency Pulses Associated With Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL097348.
- 16) Smith, D. M. et al. (2005), Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV, *Science*, **307**, 1085.

2022年富士山山頂から観測された高高度放電発光現象

鈴木智幸, 鴨川仁¹

1. 静岡県立大学

1. はじめに

高高度放電発光現象は雷雲上空で発生する放電現象で, 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. 2019年にも新たな発見があり, 特に巨大なスプライトの最上部が緑色に発光する現象が, カラー撮影されている (<https://vimeo.com/423369251>, <https://spaceweatherarchive.com/2020/05/31/introducing-the-green-ghost/>, access 2023/02/12). この現象は, 2019/5/25に北米で発見され, 発見者であるストームチェイサーHank Schyma氏によって, 推測を含むものの“**G**reen emissions from excited **O**xxygen in **S**prite **T**ops”の頭文字とRed Sprite (赤い妖精の意味)のような高高度放電発光現象のニックネームと同じように, GhOSTとニックネームを付け, これに色を付加して, Green GhOST (緑色の幽霊)と呼んでいる. その後, 様々な観測者が撮影したカラー動画の過去アーカイブにも, 同様の現象が検出されていたことがわかっている.

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. 2019年からは, 高感度カラーFHD (ハイビジョン)カメラも導入して観測を実施し, 非常に高画質な雷雲と雷放電画像が取得できることを確認している¹⁾. 2022年の観測では, FHDカラー画像に初めてGPS同期されたmsオーダーの時刻を挿入可能な機材を導入して観測を行った. この他, 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, 富士ヶ峰に設置し大幅に強化した. ここでは, 今回新たに導入したGPS時刻同期のFHD画像とFHDカラー高感度カメラ観測の結果, 2022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報告する.

2. カラーFHDとGPSタイムインポージャー

2019年の山頂からの光学観測では, 高感度一眼レフカメラによる撮影を行い, 2022年の観測では, このシステムにGPSタイムインポージャーによるmsまでの時間を挿入することを試みた. FHD画像にGPS時刻の挿入を検討した2020年当時は, FHDへGPS同期されたmsオーダーの時刻を挿入可能な機器は, 放送用(100万円以上)しか存在しなかったことから, 可能な限り低価格で実現するために, FHD画像への画像挿入技術を持つメーカーに依頼して, 既存ラインナップの機材(約20万円)を改造し, 設計費を除き約40万円でGPS時刻をms単位

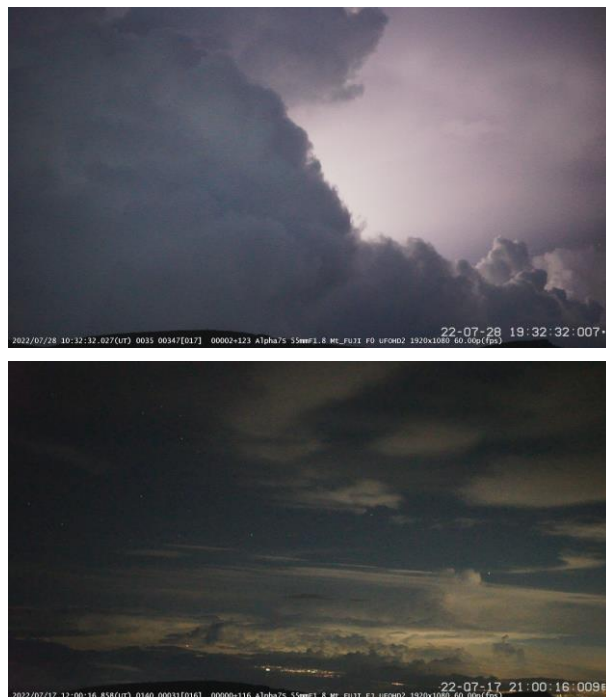


図1 GPS時刻入りのFHD画像, GPS同期時(上)とGPSエラー時(下)

で挿入可能な機材を作成した.

図1は, 開発した機材によりGPS時刻を付加した, 山頂から撮影された動画から切り出した静止画を示す. 画像右下にはms単位のGPS時刻に加えて, GPSからの1ppsを取得しているときには, ms時刻の右脇に点が表示され, 取得できないときはEを表示しGPS同期されているかどうかを確認できるようにしている.

3. 2022年の観測結果

2022年夏期の観測では, 関東地方で多数の雷放電が観測されたものの, 高高度放電発光現象の観測事例は少なく, 7/27 1200~1400UTCに, 13事例のスプライトがモノクロカメラにより観測されたのみであった. 同じ日のカラーFHDカメラは, 標準レンズで視野が狭かったことや激しい雷放電のため, 1000~1200UTCで1TBのSSDの残容量がなくなり観測が終了したことから, 当該スプライト画像は取得できていない. なお, 約一か月間で使用したハードディスク容量は20TBであった. 図2に7/27に観測された全13事例のスプライトを示す. 13例すべてが群れでの出現であり, 複数の類似のスプライトが, 時間差で発生する“ダンシングスプライト”も何例か見られたほか, 柱状と人参型等の複雑な形状のスプライトが時間差で発生し

た事例も見られた。13事例のスプライトのうち12事例で原因となった雷放電をブリッツがとらえていた。図3は、スプライトに対応する、ブリッツが標定した雷放電位置と気象庁レーダーエコーの分布である。気象庁レーダーエコーは、10分毎の値を積算し1200～1300, 1300～1400UTCの積算降水量として示している。スプライトは北関東(群馬, 栃木, 福島, 茨城)にまたがる、停滞前線の西端に形成された帯状のエコー域で発生した雷放電に伴い発生していたことが分かった。

4. まとめ

- (1) 2022年夏期は、高感度FHDカラーカメラ画像にGPS時刻を挿入できるように改良した。
- (2) GPS時刻を挿入したモノクロCCDカメラを2台設置した結果、13例のスプライトの撮影に成功した。
- (3) 13例のうち12事例でスプライト発生直前にブリッツが雷

放電をとらえていた。1事例は、スプライト発生直後に放電がとらえられていた。

- (4) スプライトは、停滞前線西端付近に位置する、北日本上空で発生した雷雲群に伴う雷放電が原因で発生していた。スプライトの発生場所は、2013年の事例とよく似ていた²⁾。

参考文献

- 1) Suzuki, T., Kamogawa, M. (2020) System Feasibility of Transient Luminous Events Observation at the Summit of Mt. Fuji, *J. Atmos. Electr.*, **39**(1), 52-56.
- 2) Suzuki, T., M. Kamogawa, H. Fujiwara, and S. Hayashi (2022), MCS Stratiform and Convective Regions Associated with Sprites Observed from Mt. Fuji. *Atmosphere*, **13**, 1460. <https://doi.org/10.3390/atmos13091460>.

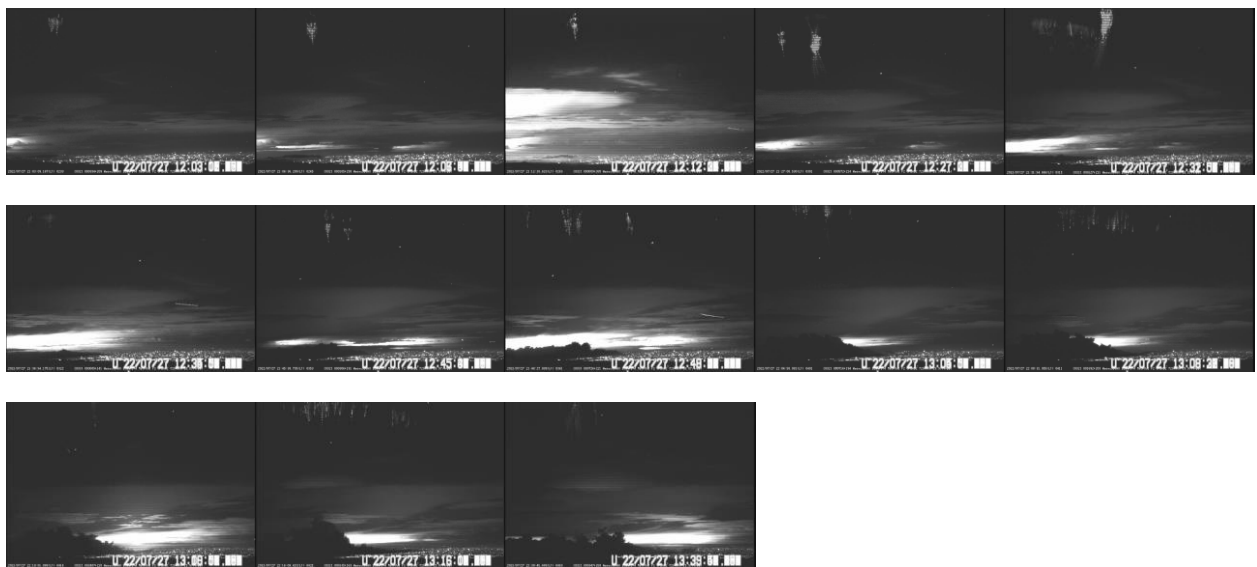


図2 2022/7/27に撮影されたスプライト。

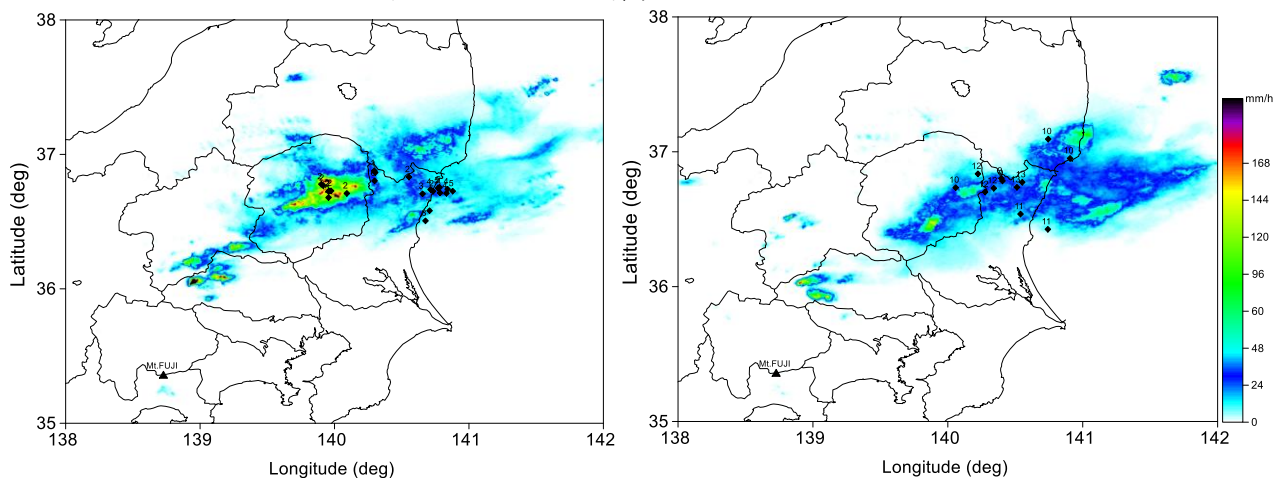


図3 2022/7/27に発生したスプライトの原因となった雷放電(黒菱形)とエコー(1時間積算)。12UTC台(左)と13時台のスプライト(右)。番号は、対応するスプライトの発生時刻順に付加している。

富士山噴火に備えよ！～小型センサーによる火山ガスモニタリング～

布袋愛斗¹, 矢田茂久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

富士山は最後に噴火してからおよそ300年が経っており今後いつ噴火してもおかしくないと考えられている。火山性ガス(H₂S, SO₂)の濃度観測装置と得られたデータをネット上で確認でき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。富士山頂では、夏期以外電源が供給されずまた、登山することもできないという問題がある一方、噴火への備えは24時間365日怠ることが出来ない。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、長距離通信機器で構成される無人観測装置が、設置された富士山頂において通年かつリアルタイムでの火山性ガスの観測を行えるようにした。さらに山頂以外の火口での噴火に備えるべく、装置の軽量性を生かして広範囲に渡る火山性ガス濃度マップを作製した。

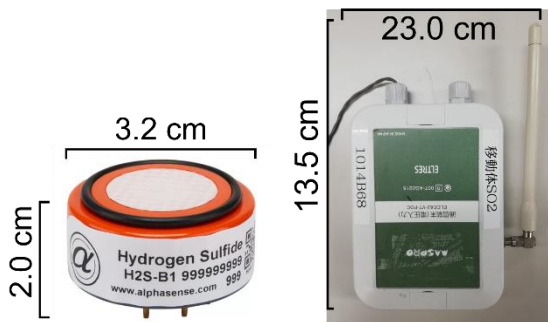


図1. 小型ガスセンサー(Alphasense 製, 左)と長距離通信端末(ELTRES の通信端末, 右)

2. 小型火山ガスセンサー

火山性ガスとしてH₂SとSO₂の測定を行った。センサーは小電力で動作する Alphasense 社の電気化学ガスセンサーを使用した(図1)。実験室内において標準ガスを用いて大型のSO₂計と本センサーの比較測定をおこなったところ数 ppb までの低濃度のSO₂検出が可能であったが、実大気においては温度変化等の影響を受けるため数十 ppb 程度の変動を生じてしまうことが分かった。

3. 実大気での火山性ガスの検出(場所:大涌谷)

実際に火山活動が活発な場所でセンサーが火山性ガスを検知できるか確かめるため、箱根大涌谷において大気観測テストを行った。その結果、火山性ガスが存在する地点では数百 ppb となるH₂S, SO₂が検出され、実大気でも本センサーが噴火の影響による火山性ガスを補足できることが確認できた。(図2)

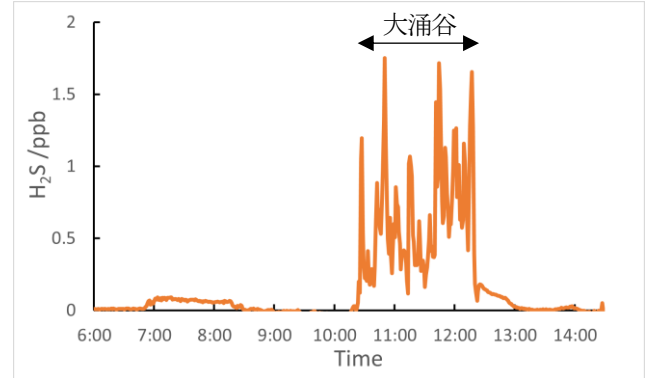


図2. 大涌谷でのフィールドワークで測定されたH₂Sの濃度(10:30 大涌谷到着, 12:00 大涌谷出発)

4. 富士山頂での無人リアルタイム観測(2021年8月～)

火山噴火は、いつ起こるか分からないものである。防災のためにはH₂SおよびSO₂の濃度をリアルタイムで把握できる必要がある。そのためには、電源の供給されない期間でも富士山頂から観測データを発信するシステムが不可欠である。ELTRESはソニーセミコンダクタソリューションズが開発した低消費電力長距離通信(LPWA)機器である。富士山測候所内部においてELTRESは、通信状況の良い窓際に設置されている。ガスセンサーからの出力はELTRESによって3分毎にインターネット上へアップロードされる。アップロードされたデータは当NPOのウェブサイト上で一般公開しており、誰もが火山性ガスの濃度を確認できる。

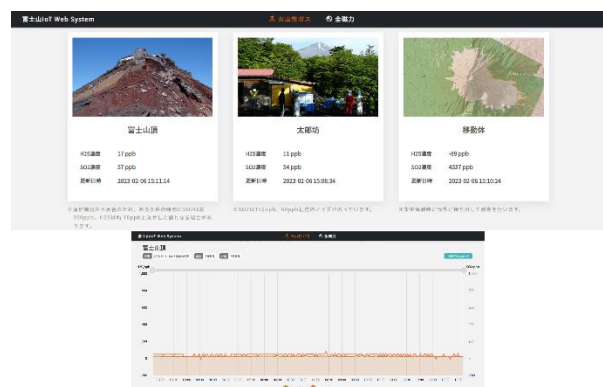


図3. 現在の火山性ガスの濃度が確認できる web ページ URL https://www.fujimonitor.org/volcanic_gas_list

このようにして富士山頂における火山性ガスの濃度記録を図4に示す。2021年8月25日から2022年7月6日までの約1年間に渡り無人かつリアルタイムで火山性ガスを観測することに成功した。システムは作業可能な夏期のおよそ1ヶ月のメンテナ

ンス期間を挟み同年8月5日に記録が再開され、現在も無人での越冬観測が行われている。バッテリー等の劣化がなければ2023年の7月まで記録は継続可能と考えられる。

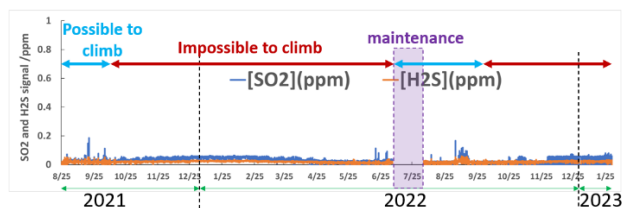


図4. 富士山頂における火山性ガスの濃度記録(2021年8月25日～2023年2月)

5. 太郎坊でのリアルタイム観測(2021年8月～)

富士山にはいくつもの火口が存在しており、噴火は山頂以外の火口からも起こる。より効率的に防災情報を得るためには、富士山頂以外の地点からでも火山性ガスのモニタリングを行う必要がある。そのため富士山麓に位置する太郎坊が多地点観測の拠点として活用されている。太郎坊は、富士山頂からおよそ8 km 南東の地点にある観測地で標高は1300 mほどである。太郎坊付近にはいくつかの火口があり、また、噴火の際には新たに火口ができる可能性も高い。したがって、この付近で火山活動が活発になった際はモニタリング結果にも素早く反映されることが予測できる。太郎坊で観測された火山性ガス濃度を図5に示す。観測装置はバッテリーの量を除き山頂で運用したシステムと同様のものを使った。バッテリー切れにより数回観測が停止したものの、大きな問題はなく運用できている。ウェブサイト上でも太郎坊の火山性ガス濃度がリアルタイムで確認できる。

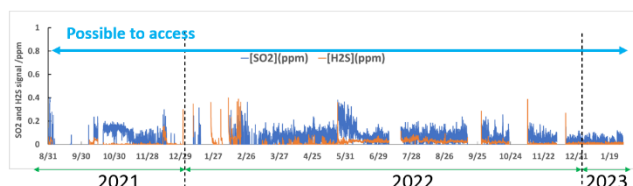


図5. 太郎坊における火山性ガスの濃度記録(2021年8月31日～2023年2月)

6. 登山道での観測(2022年5月,8月,9月)

より多くの地点で火山性ガスの濃度を測定するために、乾電池を電源とする携帯可能な観測システムを作成した。このシステムを携帯し、富士吉田ルート、御殿場ルート、富士宮ルートの4つの登山道を歩くことで広範囲に渡る火山性ガスの濃度マップを作成できた。SO₂、H₂Sそれぞれの濃度マップを図6,7に示す。

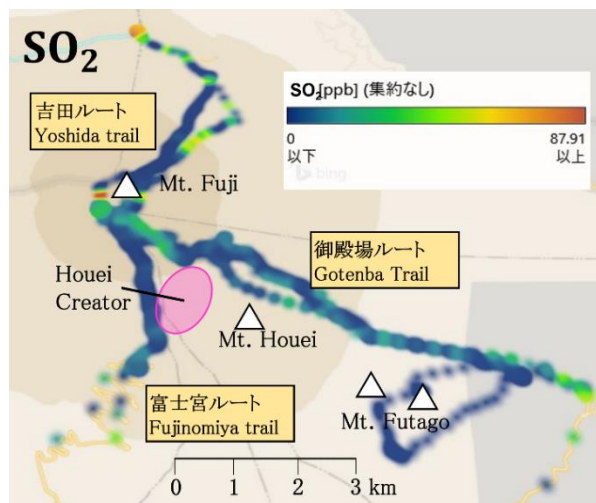


図6. 登山道におけるSO₂の濃度マップ

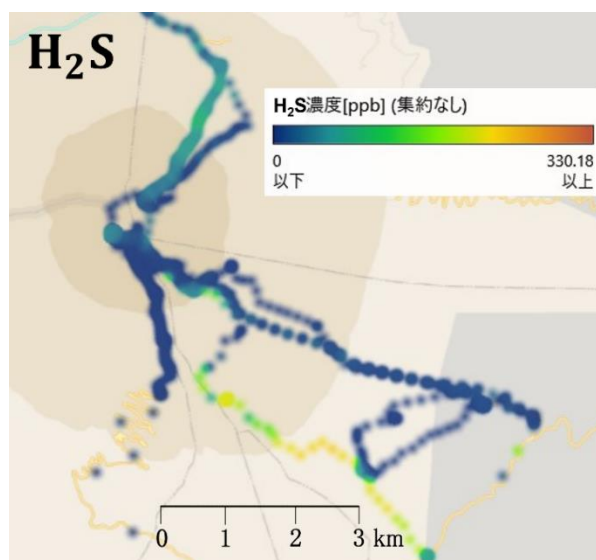


図7. 登山道におけるH₂Sの濃度マップ

7. おわりに

富士山頂における通年での無人観測、データアップロードは成功し、火山性ガスのモニタリングが順調に継続できた。さらに詳細なモニタリングを行うために多地点での観測と濃度ロードマップの作成を行った。結果として太郎坊に設置されたシステムでも通年観測が可能であることを確認でき、ロードマップの作成ではより広範囲の火山性ガス監視が可能となった。無人かつリアルタイムで火山性ガスをモニタリングできるシステムが一般に実用化できれば、登山客や近隣住民にとって有効な防災情報を提供できると考えられる。

謝辞：本研究は新技術振興渡辺記念会の援助を受けて行われました。登山道での観測は山頂班にご協力いただきました。また、多くの観測関係者に感謝いたします。

富士山における全磁力観測 —山頂近傍における電磁環境予備調査—

長尾年恭^{1,2,3}, 鴨川 仁¹, 上嶋 誠⁴, 佐柳敬造³

1. 静岡県立大学グローバル地域センター, 2. 東海大学海洋研究所, 3. 富士山環境センター, 4. 東京大学地震研究所

1. はじめに

富士山が活火山である事は良く知られるようになってきた。そして最後の噴火は1707年の宝永の噴火であり、現在まで300年以上も噴火がない状態が続いている。富士山は極めて若い火山で、将来噴火が発生する事は100%確実というのが火山学者の共通認識となっている。

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、2022年8月9日から10日にかけて実施した。具体的には山頂から宝永火口周辺にかけての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、観測点候補地の選定を行った。

2. 2022年度の研究

2022年夏は、GSM-19GW 磁力計(カナダ・GEM Systems 社製)をレンタルし、測定環境の予備調査を実施した。写真1は山頂付近での計測風景である。



写真1 山頂付近での観測風景

将来的に可能であれば、山頂のごく近傍にパーマネントの観測点の設置を計画しているが、地磁気観測は少なくとも地表から1.5メートルほどの高さにセンサーを固定しなければならず、冬期間の山頂付近での強風対策に課題が残る。

図1は2022年に実施した観測点分布の全体像である。



図1 2022年に徒歩で行った予備観測経路

図2は Google Earthの3次元表示機能を用いて観測点の位置関係を表したものである。

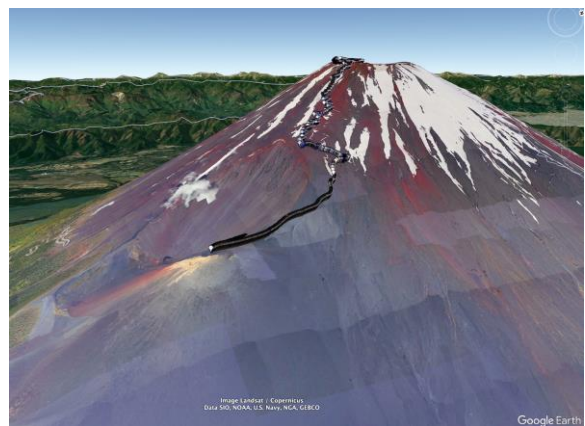


図2 予備観測点の分布の3次元表示

3. 測定結果

予備観測の結果、8合目の気象庁の地震・地殻変動観測点近傍に地磁気勾配が小さい場所が存在する事が判明した。さらにこの場所はブルドーザの登山路に隣接しており、バッテリーを始めとする営繕工事に必要な物品の輸送についても有利な条件である事が判明した。

図2は2023年2月時点の富士山およびその周辺における地磁気観測点である。現在稼働しているのは、東大地震研のFJ1と当研究グループが設置した太郎坊だけという状況であ

る。そのため、将来的には火山性低周波地震発生領域により近接する形での観測点構築を計画している。

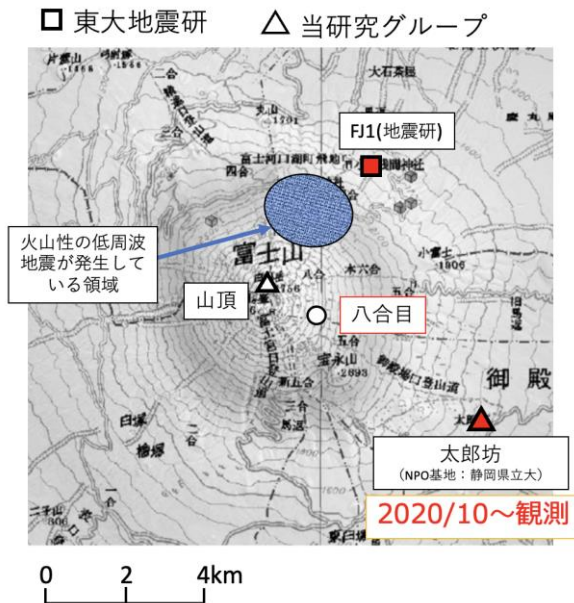


図2 2023年2月時点の地磁気観測点分布

図3に静岡県側御殿場ルート8合目近傍における地磁気予備観測の結果を示す。現時点では気象庁観測施設の南側の地域が第一の候補地となっている。

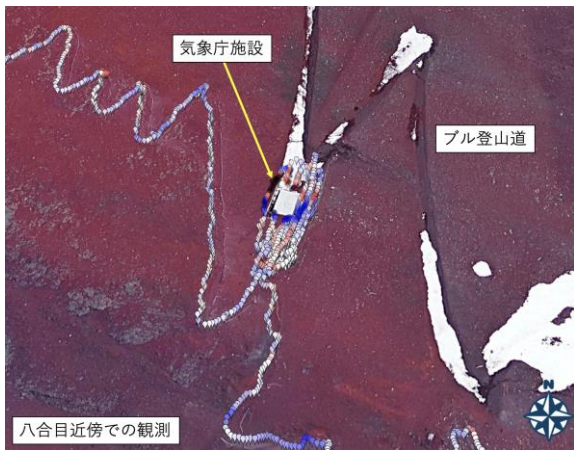


図3 御殿場口8合目近傍での予備観測

4. 今後の計画

すでに気象庁とは、8日に合目施設の現状等についての協議を開始している。当グループとしては2023年度の夏期観測期間の間に、御殿場ルート8合目近傍で数日間の予備観測の実施、およびどの程度の営繕工事が必要か等についての予備調査を計画している。2024年度に8合目のパーマネント観測点の構築を目指すものである。

なお富士山における電磁気学的な噴火予測研究は、2020年度から、IUGG(国際測地学・地球物理学協会)を構成する次の3つの学術団体(IAGA[国際地球電磁気学・超高層物理学協会], IASPEI[国際地震学及び地球内部物理学協会], IAVCEI[国際火山学及び地球内部化学協会])により設立された国際ワーキンググループ EMSEV(地震火山に関する電磁現象ワーキンググループ, 委員長:長尾年恭)の主要な研究プロジェクトとして支援される事となった。

謝辞

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

- 1) 科学研究費・基盤研究(C):課題番号:21K04613, 課題名「多角的な監視による富士山の噴火予測精度高度化の研究」
- 2) 一般財団法人 WNI 気象文化創造センター,2021 年度気象文化大賞研究助成「Geomagnetic monitoring for predicting volcanic eruption at Mt. Fuji」
- 3) 東京大学地震研究所「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」, 公募研究(課題番号 KOB017, 「富士山頂における全磁力通年観測

富士山直下の低周波地震の研究-異常を見逃さない火山活動の監視拡充に向けて-

楠城一嘉^{1,2,3}, 行竹洋平⁴, 熊澤貴雄³

1.静岡県立大学, 2.静岡大学, 3.統計数理研究所, 4.東京大学

1. はじめに

最後の富士山の噴火は約300年前の江戸時代、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回を超えていて、平均で30年に1回噴火していたことがわかっており、その10倍の期間休んでいるという指摘がある(<https://www.nhk.or.jp/ashitanavi/article/2791.html>)。懸念される噴火に備えて、富士山の異常を見逃さない丁寧な監視に資する技術開発が望まれる。

2. 目的

本講演では、低周波地震に注目した火山活動を監視する技術開発について報告する。火山の下の液体のマグマが上昇して噴火に至るので、マグマが昇ってくる予兆があるか、マグマの様子を推定することが大事である。マグマは常に動いており、周りの岩盤を割ったり亀裂に入り込んだりして、火山に特有の低周波地震が発生する。例えば富士山の低周波地震のイメージは図1aである。本研究では、噴火のない時期の低周波地震の特徴を理解し、噴火に至る様な異常時との違いにいち早く気づける可能性を探りたい。

3. データと手法

地震観測点が全国に設置されており、地表付近の揺れのデータを常時収集している。本研究では、富士山周辺の16観測点で2003-2019年に記録されたデータを使用した。

本研究では、そのデータから地震波を検知するマッチドフィルタ法(MF法)を用いた。神奈川県温泉地学研究所は同手法を用いて箱根山の低周波地震を観測している¹⁾。

2003-2019年に観測された地面の揺れのデータから、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。雑音に混じるなどして気象庁では検知していない微小な低周波地震も拾うことができた(図1b)。

噴火前にはマグマなどの流体の移動により地殻内の力のバランスが崩れ地震活動に異常が見られる可能性がある。本研究では、検知した地震を統計処理し、地下にかかる力の具合を推定し、地震活動の活発化や静穏化を捉える手法を使用した^{2,4)}。多数の地震を検知する本研究だからこそ統計処理が使えることに着目した。結果の概要は以下の通り⁵⁾。

4. 結果

- ① MF法を使用した本研究は気象庁に比べ3倍程度多く低周波地震を検知した(図1b)。
- ② 統計解析の結果、低周波地震の活発化が見出され、また

地下にかかる力の具合が変化すると推定された。

- ③ ②で見られた変化のタイミングは、東日本大震災の原因となる2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(マグニチュード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)のタイミングと合致している。

- ④ 静岡東部の地震後、火山性微動は観測されず低周波地震は静穏と報告され

(https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/Report/108/kaiho_108_13.pdf)、富士山噴火の危惧は払拭されていたが、本研究により、富士山の火山活動は影響を受けていたことが分かった。

5. おわりに

4で得た結果は、これまでにない微弱な火山活動の変化を捉える技術ができつつあり、富士山の異常を見逃さない監視体制の拡充に貢献する可能性を示している。今後、本技術を

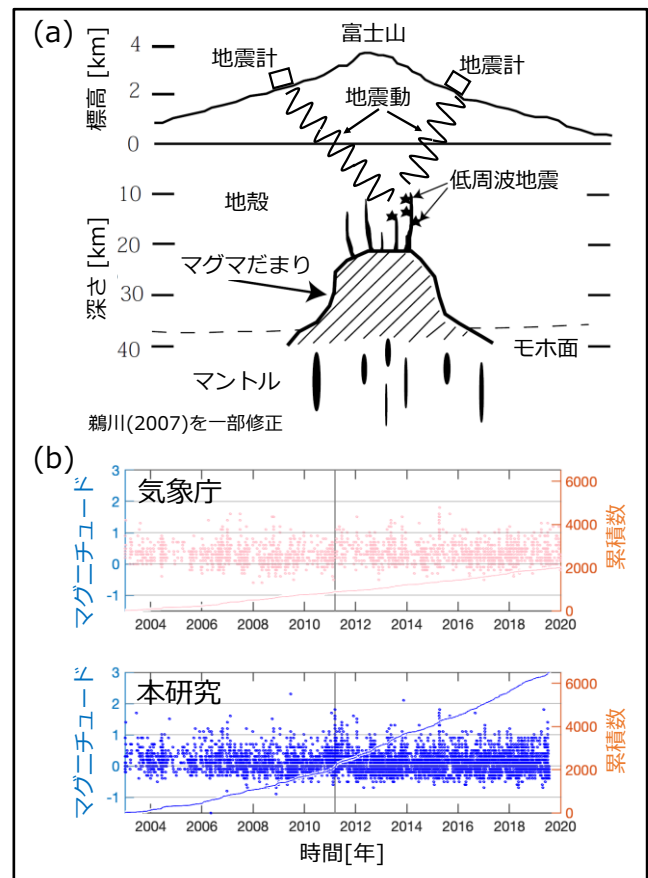


図1. (a)低周波地震のイメージ. (b)気象庁と本研究は低周波地震²⁾。東北地方太平洋沖地震と静岡東部の地震のタイミングは重なって見える(縦線)。

リアルタイムで運用する仕組みの開発を進めたい。

6. 謝辞

本研究では、気象庁一元化震源カタログ、および、気象庁、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、神奈川県温泉地学研究所観測点における地震波形記録を使用した。またJSPS科研費JP20K05050, JP21K04613, 22K03752, 20K11704の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、公益社団法人ふじのくに地域・大学コンソーシアムの共同研究助成、一般財団法人WNI気象文化創造センター気象文化大賞に係る助成、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」および「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト(STAR-Eプロジェクト)」(JPJ010217)の助成を受けて実施した。

参考文献

1) Yukutake, Y., Abe, Y., Doke, R. (2019). Deep low-frequency

earthquakes beneath the Hakone volcano, central Japan, and their relation to volcanic activity. *Geophys. Res. Lett.*, **46(20)**, 11035-11043.

- 2) Kumazawa, T., Ogata, Y., Tsuruoka, H. (2019). Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iburu earthquake. *Earth Planets Space*, **71**, 130.
- 3) Nanjo, K. Z. and Yoshida, A. (2018). A *b* map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes. *Nature Commun.*, **9(1)**, 1117.
- 4) Nanjo, K. Z. (2020). Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?. *Nature Commun.* **11**, 3082.
- 5) 楠城一嘉, 行竹洋平, 熊澤貴雄 (2022). 富士山の低周波地震の検知と統計解析, 日本地震学会 2022 年度秋季大会, 2022 年 10 月 24 -26 日 (札幌).

2022 年度までの富士山頂教育用高精密ドーム映像制作プロジェクトについて

○宮下 敦¹, 鴨川 仁², 尾久土正己³, 中山文恵³

¹ 成蹊大学, ² 静岡県立大学, ³ 和歌山大学

1. はじめに

筆者のうち、鴨川と宮下は、富士山頂での高高度発光現象の調査研究とともに、富士山頂施設を利用した教材開発を目指してきた。その一部の成果は、市販の富士砂を用いた富士山の山体の特徴を実験しながら学ぶ教材¹⁾として報告した。また、この教材開発に関連して、宮下は2017年に富士山測候所施設を利用して頂き、その際の空の景色の雄大さを、何時でも、誰でも、体験できる映像教材の必要性と可能性を強く感じた。富士山頂の空の景色全体をそのまま室内に持ち帰る方法として、高精密ドーム映像教材化を構想した。

2. 高精密ドーム映像教材の可能性

従来の映像教材は、画像モニターやプロジェクター + スクリーンで、画像は平面に映し出すことが基本であった。この場合、視聴者は同じ方向を向き、映像の撮影者が景色の中から切り取った視野を共有することになる。カメラをパンしたり、クローズアップしたりすることで、撮影者の制作意図は反映できる反面、視聴者は受動的な立場になりやすい。一方、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、ほぼ全て記録している。カメラ配置をどのようにするかといった撮影者の意図は影響するものの、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。インターネットライブ中継の場合、別々の場所にいる複数の視聴者が、撮影者と同時に情報を共有することが可能になる。つまり、臨場感のある映像を、あたかもその場にいるような没入感で視聴ができることが、全周もしくはドーム映像の特徴ということができる²⁾。

ドームスクリーンに全周天映像投影ができる重要な施設はプラネタリウムである³⁾。日本は世界的に見てもプラネタリウム施設が充実した国の1つで、2021年の時点で357施設が稼働中である⁴⁾。近年は、4Kデジタル動画が投影可能な施設が増えてきており、教育現場では理科教育用として導入している学校もある⁵⁾。

そして、重要な要素はコンテンツである。視聴者が見たいと思える映像が十分に提供されることが、全周もしくはドーム映像普及の鍵になる。富士山頂で撮影する映像は、自然の美しさと厳しさを伝える上で、非常に高い効果のあるものになると考えられる。

3. 撮影機材

4K全周動画を撮影し、これをドーム映像に変換することは、2022年の時点で市販機材やソフトウェアの組み合わせで可能な技術になっている。電源が確保できれば、夏期の富士山頂の撮影は、台風通過時などのような場合を除いて過酷ではない。本プロジェクトでは図1に示す3つの可搬な撮影機材を可搬な三脚にとりつけてテストした。

このうちプラネタリウムなどで、8K 高精密ドーム投影可能なものは、和歌山大学の Insta360Pro カメラで全周を撮像したものである。これを Adobe After Effect を用いてドーム動画に変換する。これに対して、ビデオカメラ + 対角魚眼レンズでの動画撮影したもの、およびフルサイズ一眼レフデジタルカメラ + 魚眼ズームレンズでタイムラズプ撮像して動画化したものは、ソフトウェアでドーム画像に変換する必要はなく、小型で可搬な 4K 投影システムでの利用を狙ったものである。



JVC Everio 4K
+ 土屋製作所 PTZP10-25 Canon DX1
+ Canon EF8-15 Insta360Pro

図1 テストした観測システム

4. 3年間の状況

富士山山頂教育用高精密ドーム映像製作プロジェクトは、2020年度の申請から3年間で経過した。残念ながら、この間、COVID-19 流行の影響を強く受けた。

初年度(2020年度)は、COVID-19流行が始まり、県境をまたいだ移動が制限され、都内での魚眼レンズを用いた4K動画撮影テストしかできなかった。

2年目(2021年度)からは、和歌山大の協力を得て、8K全周カメラを貸与頂き、本来の高精密ドーム映像の撮影可能な機材を準備できた。しかし、2021年度は、登山制限は緩和されたものの、山頂撮影を予定していた期間に台風が通過し、御殿場口駐車場での短時間の撮影テストになってしまった。本年度は、撮影予定期間にCOVID-19流行の影響が出て登頂できず、太郎坊の大石茶屋から登った地点での撮影になったが、カメラのバッテリーが切れるまでの2時間程度の時間で、富士山を望む空の雲の動きを8K高精密全周映像で撮影し、これを和歌山大観光学部でドーム映像(図2)に変換して試写することができた。このテストで、山頂撮影のためのノウハウの蓄積と準備は概ねできたものと考えている。成蹊大学では、動画変換ソフトウェアまでのシステムを2023年度に導入予定で、これにより独自にコンテンツ作成ができるようになる見込みである。

4. 今後について

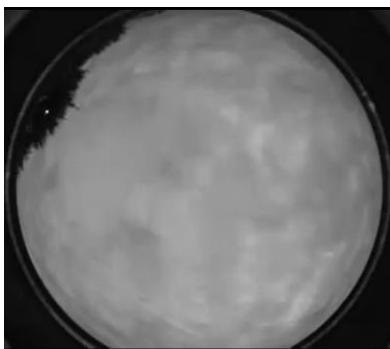
本プロジェクトのような形で、夏期の限られた機会での登頂と撮影では、富士山頂で得られる絶景を記録できるチャンスは少ない。国立天文台と朝日新聞が共同で運用している高画質ライブカメラ⁹⁾のように、定点で常時、撮影と中継ができるシステム構築が望ましい。電源の問題はあるが、冬季の富士

山頂で耐えられるシステムが構築できれば、南極・北極などの極地といった厳しい環境での運用も可能であろう。

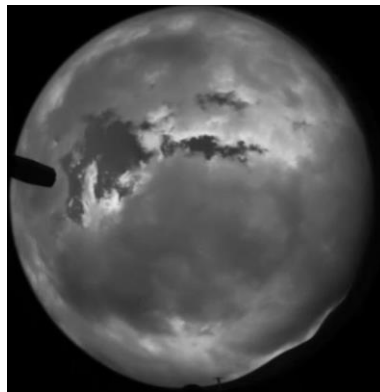
また、富士山頂では、通信関係各社が5GなどのWifi運用テストをしている。これが通年で稼働し、高細密動画映像のインターネット中継が可能になれば、可搬型のドーム投影装置と組み合わせることで、院内学級の生徒など、ハンディキャップがあることが理由で富士山登山ができない視聴者も、日本最高点からの絶景を、その場にいるような臨場感でいつでも視聴できる。現状では4Kドーム投影システムは高価であるが、低価格な4K液晶プロジェクターが普及してくれば魚眼レンズと組み合わせることにより、自作も可能になってくることが予想される。将来的には、可搬型高輝度ドームと併せて、バリアフリーでの運用も期待できると考えられる。

参考文献

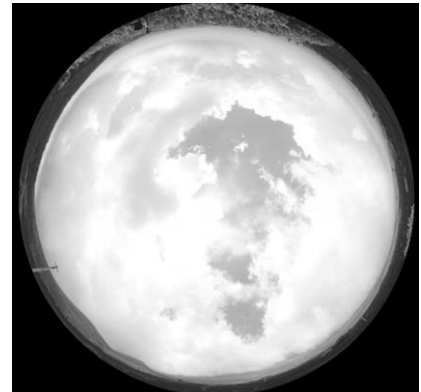
- 1) 宮下 敦 (2019). 富士山の岩石で富士山を作る-小学生向けの火山学習教材の開発とその効果. 第12回成果報告会講演予稿集, 67-68.
- 2) 尾久土正己, 吉住千亜紀(2011). 全周映像システム. 映像情報メディア学会誌, 65, 620-624.
- 3) 尾久土正己(2019). プラネタリウムの新しい利用に向けて. 映像情報メディア学会誌, 73, 475-480.
- 4) 毛利勝廣(2021). プラネタリウムの現状と活動. 天文月報, 114, 563-572..
- 5) 日本プラネタリウム協議会(2016). プラネタリウムデータブック, pp. 100..
- 6) <https://subarutelescope.org/jp/news/topics/2022/09/12/3091.html> (2023/2 最終閲覧)



JVC Eveio 4K
+ 対角魚眼レンズ
2019/10/6 に東京都国分寺市で撮影



Canon DX1 + Zoom 魚眼レンズ
2022/8/3 に御殿場口登山道で撮影



Insta360Pro による8Kドーム画像
2022/8/3 に御殿場口登山道で撮影

旧富士山測候所におけるライブカメラ実証実験

鴨川仁^{1,2}, 趙泰勇³, 林真彦²

1. 静岡県立大学, 2. 認定NPO法人富士山測候所を活用する会, 3. 株式会社 Cho&Company

1. はじめに

様々な研究用途および登山者安全でニーズの高い富士山頂での光学観測を、例年行っている夏期運用のみならず、2022年は越冬運用の試みを行った。山頂でのライブカメラ運用は、日本最高地点のライブカメラ運用となる。

2. 夏期ライブカメラ

高感度・高性能MORECAブランドのライブカメラ機器を用いて行った。本研究においては、超高画質ライブカメラの実証実験を東方向に向けて行う。本研究は2019年より行っているがLTE通信において送受信感度が悪かったため、2022年は、アンテナ感度を上げる改良を行った。画像は機器内部SDカードにて保存するのみならずリアルタイムでYouTubeにてライブ配信公開した。2021年においてもYouTubeにて配信を行ったが大きく宣伝は行わなかった。2022年については、SNS等を使って一般公開を広く周知した。その結果、YouTubeのチャンネル登録者数は約1ヶ月で1000を超えるまでに至った(図1)。7月17日設置・運用開始としたが、7月21日頃の落雷でライブカメラが故障したため、一旦回収し修理した後、8月3日から9月3日まで連続運用した。フルHDの取得画像は、良好に得られた(図2)。SDカードに記録されている動画は1秒間3フレームとなっている。



(a)



(b)



(c)

図2 2022年夏期収録された動画のスナップショット。撮影日時は画像内に組み込まれている。(a) 御来光 (b) 雲海から発達した積乱雲 (c) 夜景上の遠方雷活動と積乱雲。



図1 YouTube 登録者数の推移

連絡先：鴨川仁 (Masashi KAMOGAWA) kamogawa@u-shizuoka-ken.ac.jp

3. 越冬ライブカメラの運用の試み

2022年は、越冬中においても、山頂からの定期的な静止画の伝送を目指すため、エヌエスティグローバルリスト社製のプライベートLoRaで通信を行う、静止画撮影カメラシステム「SR-PicSen」を導入し、山頂運用に改良したのち、2022年8月下旬山頂1号庁舎2階南東窓に子局(映像送信側)、2022年11月に御殿場観測点に親局(映像受信側)を設置し、双方向の通信を行った。プライベートLoRaはLPWA通信の無線通信規格であるが、電波の送信出力は携帯電話の通信のように大きくないため、山頂と御殿場間で通信が行えるかが最も大きな課題であった。同区間の断面を調査する限りは、見通しが確保されているが(図3)、10合目三島岳でわずかに見通しが確保できない危惧もあった。しかし、通信試験の結果、通信そのものは成功し、今後観測ができることが確認できた。

本実験では、山頂のカメラ部が不具合により、画像の転送の実験までは成功しなかったが、その問題は2023年夏期の課題としたい。本システムは1時間に1枚、JPEG画像をさらに圧縮したファイルに変換して転送する。画質も図4で示されるように十分なほどのクオリティーがあり、静止画ライブカメラとして有用になることは間違いないであろう。

本実験では、山頂にて利用実績のあるGサイクロンのバッテリーを8個用いて、かつ、1号庁舎の3カ所に太陽光パネルを設置し、電源を確保している。電源が維持できるかについても2023年に検証する必要がある。



図4 NPO法人東京事務局で屋内実験したときに撮影された静止画。屋外の様子が十分判断できるほどの画質が得られていることがわかる。

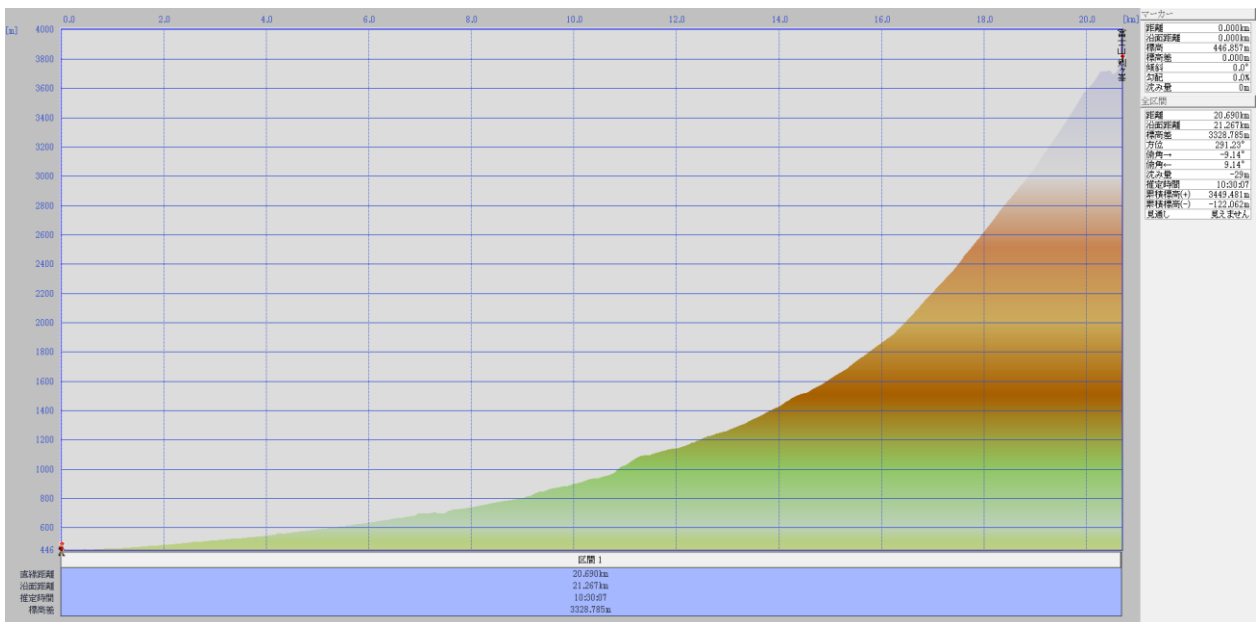


図3 旧測候所1号庁舎2階と御殿場観測点2階間の地理断面(カシミールで作成)。

日本一高い！景色を一望できるタイムラプスビューアー！ (被災地におけるバッテリー駆動型映像伝送システムの運搬・設置を含む実証実験)

村田健史¹, 村上雄樹¹, 菊田和孝¹, 長妻努¹, 東海林淳二¹, 川鍋友宏¹, 山本和憲¹, 鴨川仁², 深沢圭一郎³, 小林一樹⁴, 水原隆道⁵, 金野太一⁶

1.情報通信研究機構, 2.静岡県立大学, 3.京都大学, 4.信州大学, 5.株式会社クリアリンクテクノロジー, 6.株式会社IoTコンサルティング

1. はじめに

著者らはモバイル通信環境(4Gおよび今後の5G)を利用した低遅延・高品質な映像を伝送するシステムをこれまで開発し, その有効性を交通・防災等の地域見守りで検証してきた. これまでは電源を外部から供給し運用するシステムだったためカメラ設置位置に制約が大きかった. 申請者らのグループでは持ち運びが可能なバッテリー(液体燃料を想定)を電源とすることでモバイル通信環境であればどこからでも映像伝送が行えるシステムを開発した. これにより災害発生時に現地の映像を取得することが期待できる. 本申請では, 富士山をモデルケースとして運搬・設置・運用が可能かどうかを検証する.

2. 実験内容

今年度取り組んだ実験として, (1)映像伝送実験と(2)LoRa通信実験についてそれぞれの取り組みを紹介する.

(1) 映像伝送実験

2022/7/16 – 2022/9/2の期間10秒に1枚の静止画像と1分に5秒間の動画像を撮像し, 著者らが管理するサーバに伝送した. 実際に設置したシステムは図1の赤丸で示している.

(2) LoRa通信実験

2022/8/14 – 2022/8/15 の期間に静岡県内をGPS機能つきLoRa子機とともに移動し, 富士山頂に設置したLoRa親機との通信が可能か, 可能であればどの程度の通信強度かを調査した.

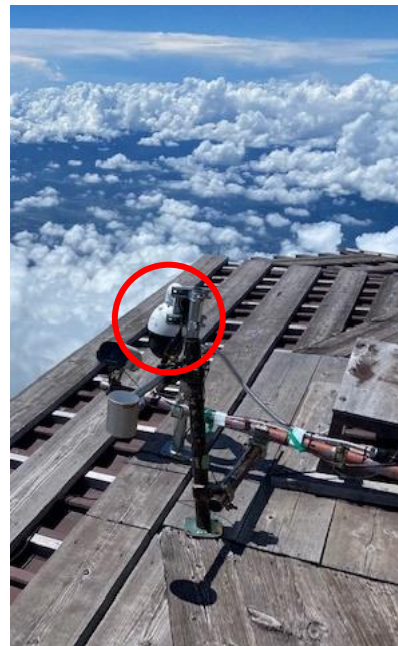


図1 設置した映像伝送システム(図中の赤丸)

3. 実験結果

(1) 映像伝送実験

著者らがこれまで設置してきたシステム同様富士山頂からであってもデータの欠損なく映像が伝送できることが確認できた. 実際に富士山頂から南側を向いて撮像を行った静止画像を図2に示す. また, 当該期間に撮像した静止画像から生成したタイムラプス動画像を京都大学から公開した¹⁾. 図3に公開したサイト(<https://jh170034.kudpc.kyoto-u.ac.jp/MtFuji/>)のサムネイルを示す. また, 本公開サイトにおいてタイムラプス動画像を表示するために著者らが開発を行ったVideoViewer²⁾を利用している.

(2) LoRa通信実験

富士山測候所から40~50km離れた駿河湾内においても-111~-130 dBmの通信強度でLoRa通信が疎通したことを確認した. 図4は各時刻におけるGPS情報とLoRa通信強度を二次元の地図上に可視化したものである.

5. おわりに

富士山山頂という悪条件下のもとでも我々の持つ高品質な映像伝送を行うことができる技術の有用性を確かめることができた。また、LoRa通信においては、富士山山頂と駿河湾という遮蔽物がない環境下であれば40km離れていても通信が可能ということを確認できた。

参考文献

- 1) 京都大学学術情報メディアセンター (2023/02/03). ”2022 年夏富士山頂タイムラプス動画像公開”.
https://www.media.kyoto-u.ac.jp/accms_web/news/2710.html
- 2) NICT-STARS (2022). ”VideoViewer”.
<https://github.com/NICT-STARS/VideoViewer>

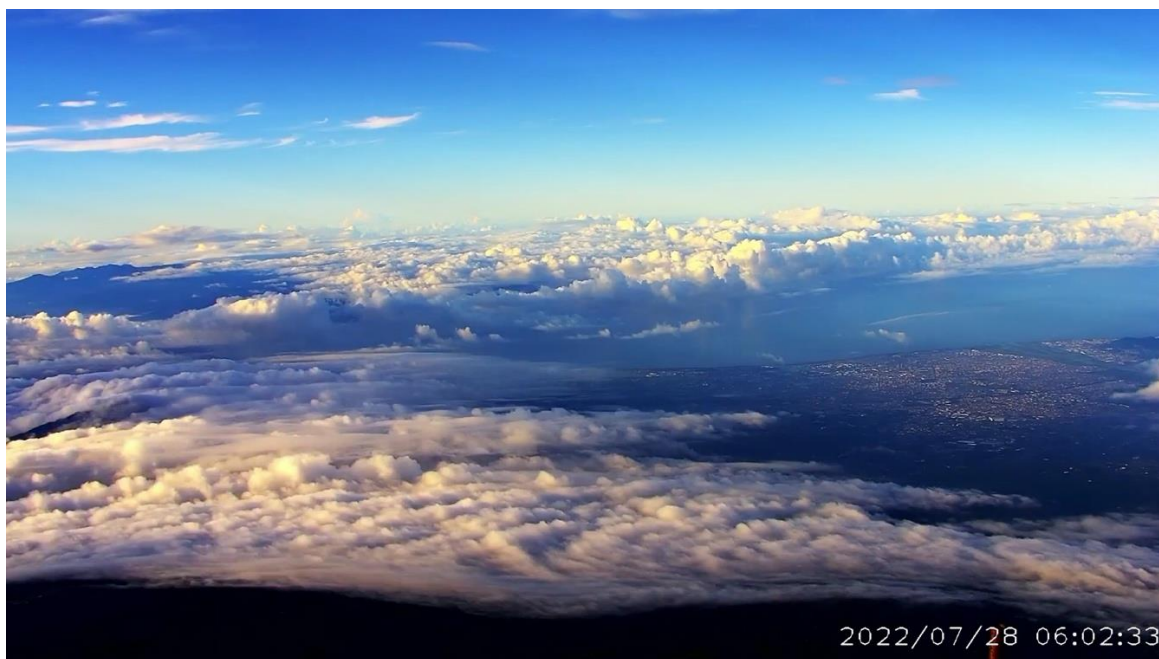


図2 富士山頂から南を向いて撮像を行った静止画像



図3 京都大学より公開予定のタイムラプス動画画像の閲覧 Web サイト

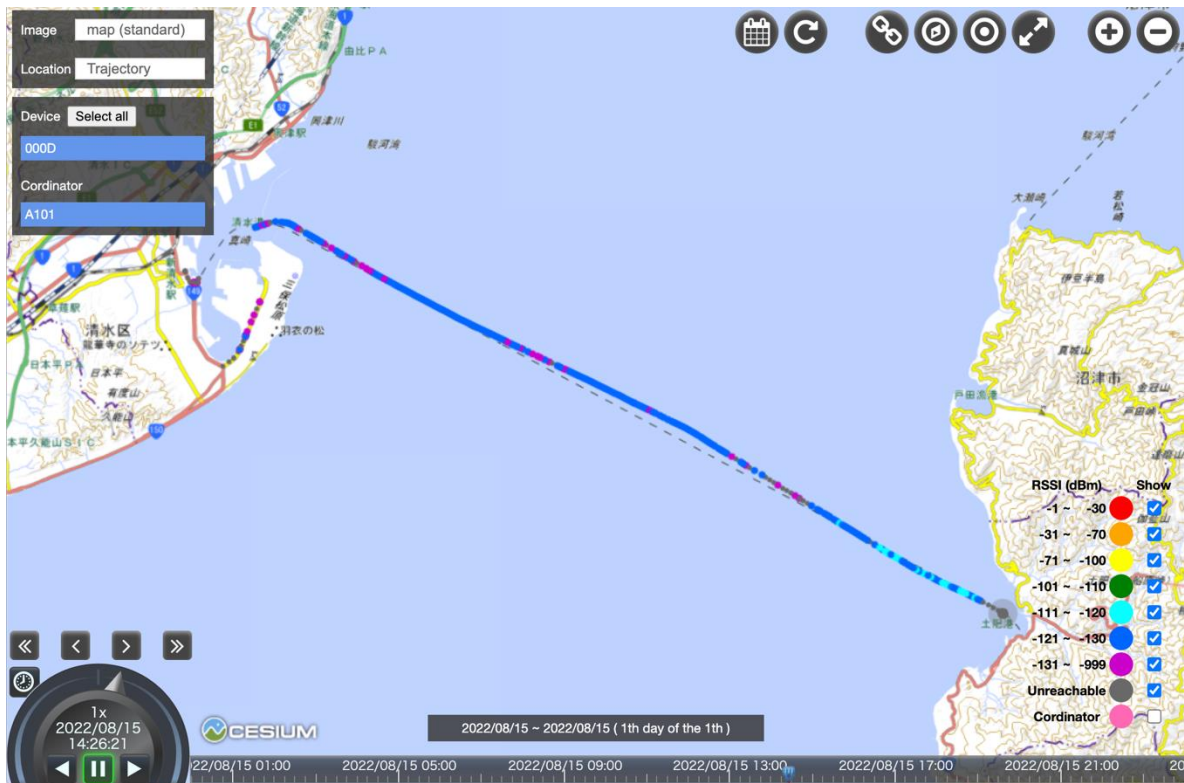


図4 駿河湾からの LoRa 通信強度を地図上にプロットした結果



第16回成果報告会講演予稿集

2023年3月18日発行

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

無断で転載または複製することを堅くお断りします



認定NPO法人

富士山測候所を活用する会