

第13回成果報告会

2007年 - 2019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：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
公益信託大成建設自然・歴史環境基金

第13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：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
公益信託大成建設自然・歴史環境基金

第13回成果報告会 要旨集

実行委員長： 和田 龍一(帝京科学大学)

副実行委員長：加藤 俊吾(首都大学東京)

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：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

公益信託大成建設自然・歴史環境基金

オーラルセッション

O-01	空飛ぶマイクロプラスチックを富士山頂で捕まえる	大河内博, 吉田昇永(早稲田大);新居田恭弘, 梅澤直樹(パーキンエルマー・ジャパン);榎本孝紀, 板谷庸平(柴田科学);三浦哲三郎, 藤原雅彦, 磯瑛司(堀場製作所/堀場テクノサービス);勝見尚也, 皆巳幸也(石川県立大);戸田敬(熊本大);竹内政樹(徳島大);米持真一(埼玉県環境科学国際センター);南齊勉(静岡理工科大);三浦和彦(東京理科大);小林拓(山梨大);和田龍一(帝京科学大);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)
O-02	富士山の山麓および山頂における植物起源の揮発性有機化合物ならびにその二次・三次生成物に関する研究	戸田敬, 和泉暲, 佐伯健太郎, 阿部光大, 平美咲, 永富加奈子, Ni Wenying, Ge Wanqi, 大平慎一(熊本大);竹内政樹(徳島大);大力充雄, 大河内 博(早稲田大)
O-03	富士山頂での火山性ガスの越冬観測	加藤俊吾, 高橋智樹, 千島峻, 辰巳紘奨(首都大);鴨川仁(静岡県立大);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)
O-04	富士山頂での温室効果ガス濃度の観測事業	野村渉平, 寺尾有希夫, 向井人史(国立環境研究所)
O-05	富士山頂の温室効果ガスの小型吸収ライダーによる観測	小林喬郎(福井大);椎名達雄, 久世宏明(千葉大);矢吹正教(京都大);三浦和彦(東京理科大)
O-06	富士山頂における大気電気・雷研究	鴨川仁(静岡県立大);大気電気・雷研究グループ
O-07	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	安本勝(富士山環境研究センター);鴨川仁(静岡県立大);佐々木一哉(弘前大);土器屋由紀子(富士山環境研究センター)
O-08	富士山を利用した高所登山のためのアクティブラーニングの試み	笹子悠歩, 照内明良(鹿屋体育大);井出里香(東京都立大塚病院);油井直子(東京慈恵医大スポーツ・ウエルネスクリニック);山本正嘉(鹿屋体育大)
O-09	富士登山における体幹2点歩行動揺計による動的歩行バランスの評価	井出里香(東京都立大塚病院 耳鼻咽喉科);油井直子(東京慈恵医大スポーツ・ウエルネスクリニック);笹子悠歩, 照内明良, 山本正嘉(鹿屋体育大)
O-10	宇宙線ミュオンによる富士山透視の試み	井居島薫(山梨大);永嶺謙忠(山梨大, 高エネルギー加速器研究機構);藤牧拓郎, 鳥養映子, 鈴木秀典, 鈴木美季, 小林拓, 白木一郎, 堀裕和, 後藤聡(山梨大)
O-11	富士山頂におけるPM ₁₀ 中無機元素の昼夜別変動	米持真一, 堀井勇一(埼玉県環境科学国際センター);畠山史郎(アジア大気汚染研究センター);崎山浩太, 大河内博(早稲田大);Ki-Ho Lee(韓国済州大)
O-12	富士山体を利用したスカイラジオメータによるエアロゾルの鉛直分布観測	桃井裕広(千葉大);新沼拓(東京理科大);青木一真(富山大);森樹大(東京理科大);鴨川仁(静岡県立大);大河内博(早稲田大);入江仁士(千葉大);三浦和彦(東京理科大);中島映至(宇宙開発研究機構)
O-13	富士山頂における日中と夜間に発生する新粒子生成イベントの長期観測	五十嵐博己, 森樹大, 三浦和彦, 永野勝裕(東京理科大);矢吹正教(京都大);岩本洋子(広島大);和田龍一(帝京科学大);加藤俊吾(首都大);大河内博(早稲田大);鴨川仁(静岡県立大)
O-14	富士山山頂における花粉と花粉を宿主とした微生物の高度運搬の可能性	三木健司(京都大);磯部洋明(京都市立芸術大);福間大起, 伊藤梓, 坂東日菜(京都大)
O-15	2019年富士山頂における大気中氷晶核および微生物組成の観測	村田浩太郎(静岡県立大);大河内博(早稲田大);鴨川仁(静岡県立大)

ポスターセッション

P-01	富士山頂の風はどこから吹いてくる？ ～1分ごとに風向を見る～	皆巳幸也(石川県立大, 富士山測候所を活用する会);鴨川仁(静岡県立大, 富士山測候所を活用する会)
P-02	旧富士山測候所への高速度登山時におけるパルスオキシメーターによるモニタリング結果	前田源次郎(秋田大通信教育講座受講生)
P-03	富士山チャレンジ2019実証実験報告	田中義朗, 安永隆一, 畠中雅弘, 福崎昭伸(一社 富士山チャレンジプラットフォーム);鴨川仁(静岡県立大)
P-04	富士山でのポータブルガスセンサーを用いた火山性ガスの測定	高橋智樹, 千島峻, 辰巳紘奨, 加藤俊吾(首都大);鴨川仁(静岡県立大);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)

ポスターセッション

P-05	富士山山頂および山麓におけるエアロゾルの散乱係数	田中賢人, 乾諒介, 森樹大, 三浦和彦(東京理科大); 矢吹正教(京都大); 桃井裕広(千葉大)
P-06	高所滞在中の血行動態に自律神経が及ぼす影響についての検討	小森孝洋, 金澤英紀, 星出聡, 苅尾七臣(自治医大)
P-07	富士山体を利用した自由対流圏および大気境界層における雲水化学特性(6)	大力充雄, 大河内博, 中村恵(早稲田大); 勝見尚也, 皆巳幸也(石川県立大); 米持真一(埼玉県環境科学国際センター); 三浦和彦(東京理科大); 加藤俊吾(首都大); 和田龍一(帝京科学大); 竹内政樹(徳島大); 戸田敬(熊本大); 土器屋由紀子, 畠山史郎(富士山環境研究センター)
P-08	富士山の永久凍土研究: 経過観察(2019年)	池田敦(筑波大)
P-09	富士山頂および山麓における雲粒中の硫酸イオン定量	南齋勉, 片井遼(静岡理工科大); 山本祐志(グリーンブルー); 大河内博(早稲田大)
P-10	富士山麓太郎坊に輸送された二次粒子の成長過程に関する研究	大藪良祐, 五十嵐博己, 森樹大, 三浦和彦(東京理科大); 大河内博(早稲田大); 皆巳幸也(石川県立大)
P-11	The Hidden Diurnal Cycles of Atmospheric Methane at the Top of Mt. Fuji	Chang-Feng Ou-Yang, Neng-Huei Lin(National Central University, Taiwan); Shungo Kato(Tokyo Metropolitan University, Japan); Kojiro Shimada, Hiroshi Okochi(Waseda University, Japan); Ting-Hung Yu(Academia Sinica, Taiwan)
P-12	火山噴火予測のための富士山頂における地磁気観測: システム動作試験	長尾年恭(東海大); 鴨川仁(静岡県立大)
P-13	富士山頂と山麓太郎坊で観測した気柱全体のエアロゾルの光学特性	新沼拓(東京理科大); 桃井裕広(千葉大); 安齊真央, 田中賢人, 森樹大, 三浦和彦(東京理科大); 青木一真(富山大); 大河内博(早稲田大); 鴨川仁(静岡県立大)
P-14	急性低圧低酸素曝露が覚醒時および睡眠時の生理心理的指標に及ぼす影響とその順化	林聡太郎, 平野晋吾(福山市立大); 澤田結基(安田女子大); 野瀬由佳(福山市立大); 山口正寛(安田女子大)
P-15	ジャンピングシーラスの撮影と平均的な形態	岩崎杉紀, 瀬口貴文, 山口智子(防衛大); 鴨川仁(静岡県立大)
P-16	富士山頂における粒子濃度増加イベントの観測	井波真哉, 東秀憲, 猪股弥生, 瀬戸章文, 大谷吉生(金沢大学); 森樹大, 三浦和彦(東京理科大); 加藤俊吾(首都大)
P-17	2019年高高度放電発光現象および広域雷活動研究	鈴木智幸(東京学芸大); 鴨川仁(静岡県立大); 長尾年恭(東海大)
P-18	富士山頂・太郎坊で捕集したエアロゾル粒子の個別分析	牧野脩哉, 市毛友彬, 森樹大, 三浦和彦(東京理科大); 足立光司(気象研究所)
P-19	新型広帯域大気電場測定機器の実証実験	工藤剛史(音羽電機工業); 鴨川仁(静岡県立大)
P-20	2019年富士山頂における窒素酸化物の計測	松田響, 和田龍一, 緒方智大(帝京科学大); 定永靖宗(大阪府立大); 加藤俊吾(首都大); 大河内博(早稲田大); 森樹大, 三浦和彦(東京理科大); 小林拓(山梨大); 鴨川仁(静岡県立大); 松本淳(早稲田大); 米村正一郎(農研機構); 松見豊(名古屋大); 梶野瑞王(気象研); 畠山史郎(アジア大気汚染研究センター)
P-21	富士山頂に流入する大気中粒子状物質のオンライン分析2019	竹内政樹, 前田夏穂, 和田莉緒菜, 田中遥, 田中秀治(徳島大); 戸田敬(熊本大); 大河内博(早稲田大)
P-22	富士山剣ヶ峰における風の観測及び風速計の特性調査	安部大介, 大塚靖子, 吉田一成(ウェザーニューズ); 鴨川仁(静岡県立大)
P-23	ライブカメラによる光学観測	鴨川仁(静岡県立大); 趙泰勇(Cho&Company)
P-24	EL TRESを用いた富士山頂通年科学計測	加藤俊吾(首都大, 富士山測候所を活用する会); 荒島謙治(ソニーセミコンダクタソリューションズ); 鴨川仁(静岡県立大, 富士山測候所を活用する会)
P-25	成蹊高高度発光観測カメラによる富士山頂カメラとの同時観測	宮下敦, 藤原均(成蹊大); 鈴木智幸(東京学芸大); 鴨川仁(静岡県立大)
P-26	旧富士山測候所における科学観測の火山防災・減災への活用可能性の考察	伊藤有羽(慶應義塾大)
P-27	日本エクアドル外交樹立 100 周年記念友好登山隊研究実施状況報告(於: エクアドル)	中谷康司(中央大)
P-28	2019年富士山での雷活動高エネルギー放射線観測	鴨川仁(静岡県立大); 榎戸輝揚(理化学研究所); 和田有希(東京大); David Smith(カリフォルニア大サンタクルーズ校); 鈴木智幸(東京学芸大)
P-29	富士山頂を活用した災害時LPWA通信の検討	湯瀬裕昭(静岡県立大); 鍋田真一(城南静岡高等学校); 菅原巧貴(テクノサイト); 鴨川仁(静岡県立大)

空飛ぶマイクロプラスチックを富士山頂で捕まえる

○大河内博¹, 吉田昇永¹, 新居田恭弘², 梅澤直樹², 榎本孝紀³, 板谷庸平³, 三浦哲三郎⁴, 藤原雅彦⁴, 磯瑛司⁴, 勝見尚也⁵, 皆巳幸也⁵, 戸田 敬⁶, 竹内政樹⁷, 米持真一⁸, 南齊勉⁹, 三浦和彦¹⁰, 小林拓¹¹, 和田龍一¹², 土器屋由紀子¹³, 畠山史郎¹⁴

1 早稲田大学, 2 パーキンエルマー・ジャパン, 3 柴田科学, 4 堀場製作所/堀場テクノサービス, 5 石川県立大学, 6 熊本大学, 7 徳島大学, 8 埼玉県環境科学国際センター, 9 静岡理工科大学, 10 東京理科大学, 11 山梨大学, 12 帝京科学大学, 13 富士山環境研究センター, 14 アジア大気汚染研究センター

1. はじめに

プラスチック生産量は年々増加しており、総生産量は1950年には年間200万トンでしたが、2012年には3億トン、2050年には400億トンに達すると推計されています¹。その結果、河川を通じて大量の海洋プラスチックゴミが発生しています。

プラスチックゴミのうち、直径5mm以下のプラスチック片の総称であるマイクロプラスチック (microplastics; MPs) は、海洋生物が餌と誤認して摂食することから、特に問題となっています。摂食を通して体内に取り込まれたMPsが及ぼす被害は2つに分類されています。一つは物理的摂食障害であり、MPsが魚類や鳥類の胃から検出されています。もう一つは生体毒性です。もともとのプラスチック添加剤、プラスチックが環境中で吸着した有害な有機化合物が体内に移行して生体に影響を与えることが懸念されています。これまで、MPs研究は海洋生態系の破壊という観点から進められてきました。

大気中マイクロプラスチック研究の現状

最近では河川、水道水、ペットボトル、道路粉塵、室内空気でもMPsが検出されています。米国の推計によると、MPsが体内に取り込まれる経路は食物と呼吸が同程度でそれぞれ年間6万個程度、ペットボトル水から年間9万個を摂取します²。ただし、空気中に浮遊しているマイクロプラスチック (Airborne microplastics; AMPs) の計測例は限られていて、その実態はよく分かっていません。

AMPsに関する先行研究としてフランス・パリ郊外^{3,4}や中国・広東省⁵で行われた研究があります。大部分が空気中を浮遊するAMPsではなく、雨とともに地上に降ってくるAMPsです。都市部におけるAMPsの形状は、浮遊しているものも、降ってくるものも繊維状が多く、フィルム状、破片状、発泡体は少ない傾向にあります。

空気中を浮遊するAMPsの報告例は数例に限られますが、例えば、パリ (フランス) では室内空気1m³あたり1-60本の繊維が存在しており、その66%がセルロースなどの天然繊維で、ポリエチレンなどのプラスチックは33%に過ぎないようです⁴。屋外では空気1m³あたり0.3-1.5本 (50-1650μm) の繊維が浮遊しています⁴。イラン南岸

部アサルイエの都市大気も大部分は繊維であり、空気1m³あたり0.3-1.1本 (2-100μm) ですが、天然繊維か合成繊維 (プラスチック) か不明です⁶。上海 (中国) の都市大気では空気1m³あたり0-4.18個 (23-9555μm) であり、67%が繊維状です⁷。同じ著者が同地点で計測して、空気1m³あたり0.05-0.07個 (12-2191μm) であり、43%が繊維状⁸という報告もあります。

AMPsに関する研究はほとんど都市大気に関するものですが、最近になってマイクロプラスチックが大気を通じて輸送され、山間部 (フランス, ピレネー山脈) に1日に1m²あたり365個 (65μm以上) のプラスチックが降り注いでいることが明らかにされました⁹。この量は都市部とほとんど変わらないことから、海洋ばかりではな、大気を通じたマイクロプラスチック汚染が広域的に起きていると警鐘を鳴らすものでした。また、山間部では都市部とプラスチックの形状が大きく異なり、破片状、フィルム状AMPsが多く、繊維状AMPsは少ないものでした。

大気中マイクロプラスチック研究の課題

以上のように、AMPs計測値にはかなりのばらつきがあります。その原因は採取法、前処理法、同定法にあります。空気中を浮遊するAMPsは、一般にエアロゾル捕集に用いられるガラス繊維フィルターで捕集しています。また、プラスチック以外の粒子と分離せず、前処理をしないで顕微鏡観察や顕微FT-IRで同定を行っています。

でも、繊維フィルターを用いて、空気中に浮遊する繊維を正確に測ることができのでしょうか？また、繊維フィルターでは小さいMPsは埋もれてしまい識別が困難です。さらに、ガラスファイバーは1000-1400cm⁻¹に強い吸収をもつため、ガラス繊維フィルター上のAMPsの同定は困難です。仮にガラス繊維フィルターの影響を受けずに、顕微FT-IRでAMPsの同定を行っても、AMPs表面がバイオフィルムで覆われていれば、正しく材質を同定することができません。

そこで、私達は空気中に浮遊するマイクロプラスチック (AMPs) を正しく測るために、AMPsを捕集する材質は何がよいのか、どのように前処理するとよいのか、さらにどうやって計測すればよいのかを検討しました。

2. 実験

エアロゾル採取法の検討

まず、AMPsの捕集法について検討しました。東京都新宿区に位置する早稲田大学西早稲田キャンパス研究棟屋上(64m)で、アンダーセンサンプラーローボリウムサンプラー(柴田科学)でエアロゾルを、ステンレス容器で雨水を採取しました。エアロゾルの捕集材として石英繊維フィルター、アルミホイル、ステンレスプレートについて検討しました。石英繊維フィルターでは繊維にAMPsが埋もれてしまい、計測できませんでした。アルミホイルは多少、残渣が残りますが、AMPsの同定は十分に可能でした。ステンレスプレートでは捕集材残渣がなく、最適であることが分かりました。

富士山頂では雲が頻繁に発生するので、雲を除去するためにPM2.5サイクロン分級装置(柴田科学)を用いてエアロゾルを採取しました。フィルターにはテフロンフィルターを用いました。

前処理法の検討

海洋MPs前処理法の一般的な考え方を図1に示します。海洋では微生物が多数存在しており、プラスチック表面には微生物がコロニーを形成しており、**プラスチック生命圏(plastisphere)**と呼ばれています¹⁰。このためMPs表面の有機薄膜を除去する必要があり、過酸化水素などで処理してから重液を用いて密度差により、軽いMPsと重い鉱物粒子などを分離法してMPsのみを回収します。

雨水やエアロゾル水抽出液のろ過に用いるフィルター、有機物分解法と分解時間、密度分離法について検討を行い、AMPsを分析するための最適条件を決定しました。詳細は発表時に示します。

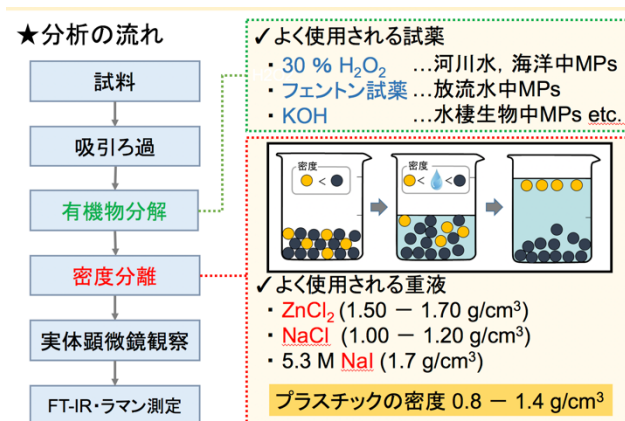


Fig. 1 Analytical protocol of MPs in the environment

顕微FT-IR/顕微ラマン分光法によるAMPs同定法の検討

一般に、MPsの同定に用いられる分析装置が、顕微FT-IRと顕微ラマン分光法です。顕微FT-IRはパーキンエルマ

ージャパン、顕微ラマン分光法は堀場製作所の協力を得てAMPsの同定方法を確立しました。これまで報告例がなかった数 μm のAMPs同定が可能となりました。

3. 結果と考察

2019年の7月、8月に富士山頂で夜間(自由対流圏)にPM2.5の観測を行いました。図2には7月26日から8月6日まで採取したPM2.5で検出されたAMPsを示します。富士山周辺では7月26日から27日に台風6号の影響を受けましたが、サンプラー内に雨の侵入はありませんでした。計測途中ですが、1mm x 1mmの領域を顕微ラマン分光法で計測したところ(全面積の0.5%)、10個のAMPsが検出されました。ただし、⑨のテフロンは捕集フィルター残渣なので除外すると、実粒径で1.4 - 12 μm のマイクロカプセルや生分解性プラスチックなど多様なAMPsが9個見つかりました。繊維状ではなく、ビーズ状と破片状が同程度でした。個数濃度を概算すると、都市大気の新宿と変わりませんでした。

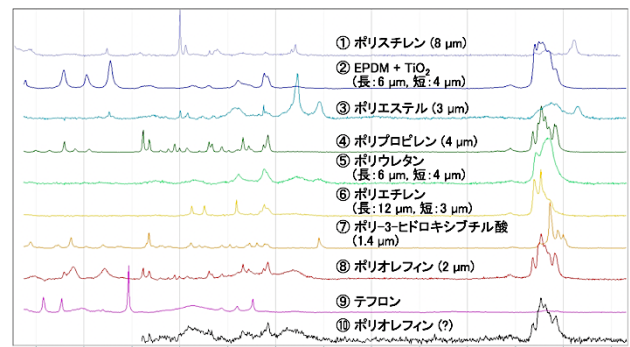


Fig. 2 Airborne microplastics detected in PM2.5 collected at night on July 26 - August 6, 2019 at the summit of Mt. Fuji

5. おわりに

予備観測ですが、自由対流圏大気から初めてAMPsが見つかりましたので、大気を通じたMPsの地球規模汚染が起きている可能性をしています。さらなる研究が必要です。

参考文献

1. Zalasiewicz, et al. (2016) *Anthropocene*, 13, 4-17.
2. Cox et al. (2019) *Environ. Sci. Technol.*, 53, 7068-7074.
3. Dris et al. (2016) *Marine Polluti. Bull.*, 104, 290-293.
4. Dris et al. (2017) *Environ. Polluti.*, 221, 453-458.
5. Cai et al. (2017) *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 24928-24935.
6. Abbasi et al. (2019) *Environ. Polluti.*, 244, 153-164.
7. Liu et al. (2019a) *Sci. Total. Environ.*, 675, 462-471.
8. Liu et al. (2019b) *Environ. International*, 132, 105127.
9. Allen et al. (2019) *Nature Geoscience*
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>;
10. Zettler et al. (2013) *Environ. Sci. Technol.* 47, 7137-7146.

富士山の山麓および山頂における植物起源の揮発性有機化合物 ならびにその二次・三次生成物に関する研究

戸田 敬¹, 和泉 椋¹, 佐伯健太郎¹, 阿部洸大¹, 平 美咲¹, 永富加奈子¹, Ni Wenyong¹,

Ge Wanqi¹, 大平慎一¹, 竹内政樹², 大力充雄³, 大河内 博³

1. 熊本大学, 2. 徳島大学, 3. 早稲田大学

1. はじめに

植物からは多くの揮発性有機化合物 (biogenic volatile organic compounds: BVOCs) が発生しており, これらは大気化学で重要な働きを担っている. 日本は国土の 68% が森林で占められるため, 国土全体で考えると BVOCs の発生量は人為起源 (anthropogenic: AVOCs) よりもむしろ多いと推定される.

BVOCs で特異的な化合物は炭素 5 個, 水素 10 個をユニットとする化合物群であり, その 2 ユニット分 $C_{10}H_{20}$ に相当するのがピネンやリモネンなど森や果実, 草に特異的な香りの成分であるモノテルペン類で, 様々な種類がある. その半分の C_5H_{10} の化学式を持つのはイソプレンのみであり, ヘミテルペンとも呼ばれる. 主に, 針葉樹からはモノテルペン類, 広葉樹からはイソプレンが放出される. イソプレンは分子内に 2 つの二重結合を持つため, この部位が大気中の酸化剤 (オキシダント) の攻撃を受け, 容易に分解される. 分子の末端に位置する二重結合が反応した場合, その末端断片は 90% の収率でカルボニル化合物のひとつであるホルムアルデヒドになる. また, その反対側の大きな部位はさらに多段階の反応を受けさまざまな化合物になると考えられている. グリオキサールやメチルグリオキサールのような「ジ」カルボニル類も高い収率で生成する¹⁾. 酸化がさらに進んだ状態として, 有機酸の生成も考えられる. また, 大気粒子内では, 二次生成したカルボニル類が, アンモニアなど窒素を含む化合物とさらに反応し, 窒素を含む環状の有機化合物 (ヘテロ環化合物) が生成している可能性がある²⁾.

カルボニル化合物・有機酸化合物は, 吸湿性が高く, 森林や山岳地域で大気粒子を形成する基になっている可能性がある. また, 粒子内ではこのような化合物が高濃度に濃縮され, お互いに反応していくことも予想される. そこで, 富士山麓の樹林帯の一角に位置する太郎坊と山頂にて, イソプレン濃度の推移を測定した. また, 太郎坊は, 大気粒子を捕集し, 含まれる有機酸の分析を試みた. さらに, 富士山頂で採取した雲水試料をいただき, 雲水に含まれる有機酸やカルボニル類ならびにヘテロ環化合物であるイミダゾール類の分析を行った.

2. 実験

イソプレンは, 熊本大学で開発した装置により, 10~20 分毎に分析を繰り返した. これは特殊なシリカゲルに数分間大気を通じてイソプレンを捕集し, その後カラムを加熱して脱着させ, オゾンと反応させて生じる化学発光を検出するもので single column trapping/separation-chemiluminescence detection (SCTS-CL) と呼んでいる. 2 台の SCTS-CL 装置を山頂と太郎坊に設置し, 同時に双方でのイソプレンを測定した. この間, 太郎坊で大気粒子の捕集も行った.

雲水は NPO 山頂班の協力により, 雲が発生した際, 細線式のパッシブサンプラーで得られた雲水をバイアル瓶に 2 本に分けていただいた. また, その内の 1 本は, 採取と同時に DNPH と言われる試薬を添加し, 含まれているカルボニル化合物を誘導体化し, 安定化するとともに分析が可能な状態とした.

フィルター採取した試料は水で抽出したあと, また雲水はそのままカルボン酸やイミダゾール類の分析を行った. 分析は高速液体クロマトグラフィーにタンデム型質量分析計 (HPLC-MS/MS) を組合せて, 分離と検出を行った.

3. 結果と考察

太郎坊と山頂でのイソプレン濃度の推移

台風の接近により予定より 24 時間短くなってしまったが, 麓と山頂でのイソプレン同時観測に成功した. 測定結果を Fig. 1 に示す. 樹林帯にある太郎坊では, イソプレン濃度は日中に上昇し夜間低濃度になる周期的な推移が観測された. イソプレンは光合成の進行とともに発生するが, 得られた結果は森林内での典型的なパターンと言える. 一方, 山頂では夕方に高濃度になる傾向が見られた. 日中山麓で発生したイソプレンが谷風 (upwind) によって山頂に運ばれたことも考えられるが, 山頂付近は常に西から気団が来ており, 西からの影響も考えられる. 気団のルートには南アルプス山脈があり, 山体で発生したイソプレンが斜面に沿って発生した上昇気流によって南北に連なる山稜に到達し, 上空を移動する気団に取り込まれ, そのまま富士山頂に到達することが考えられる. イソプレンは日射によって生じる OH ラジカルと容易に反応するため, 日中の寿命は 1~2 時間と言われている. このような物質が, 発生ピークを過ぎた夕方や宵に極大を

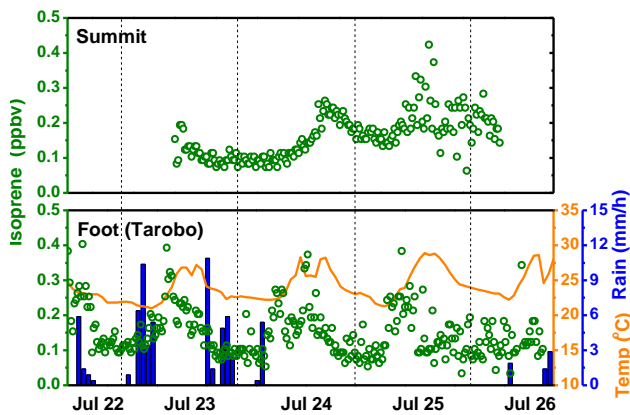


Fig. 1 Diurnal variations of isoprene concentration on the top and foot of Mt. Fuji.

迎えるのは不思議な現象である。また、その濃度も森林内の濃度に匹敵している。高層大気ではラジカルが少なく、化合物の分解も遅い、と考えられる。このような複雑な機構により、比較的高い濃度のイソプレンが富士山頂の夕方から宵に見られたと推測している。植物を起源とする物質特有の現象と考えられる。

雲水のジカルボニル、有機酸やイミダゾール： 大気粒子とともに雲水もさまざまな極性有機化合物を取り込む場や二次反応の場になっている。イソプレンなどの BVOCs を出発物質とするカルボニル類について雲水からの検出を試みた。

2019 年に採取した雲水は、2018 年に比べると無機の陽イオン、陰イオンをはじめ、カルボニル類の濃度がかなり低く、昨年の 1/4~1/10 であった。その結果、雲水で生成するのではないかと予想したイミダゾールも、imidazole-2-carboxaldehyde (IMC) が少量見られただけであり、そのほかのイミダゾールは検出されなかった。

2019 年にはじめて雲水の有機酸の分析を試みたが、数百 nM (nano-mol/L) のオーダーでギ酸、酢酸、ピルビン酸などが見られた。また、コハク酸、メチルグリセリン酸、ケトピン酸、ピノン酸も数~数十 nM のオーダーで検出された。雲水にこのような有機酸が見いだされ、植物を起源として生成した酸が雲水に取り込まれていることが確認された。高層の大気粒子でも同様のことが起こっていると考えられ、山岳域ではこれらの有機酸が大気粒子の発生や成長に寄与していると予想される。太郎坊において採取した大気粒子からの有機酸の検出も試み、本結果も合わせて報告する予定である。

5. おわりに

富士山を取り巻く中部地域の広大な森林から最も多く発生する BVOCs と考えられるイソプレンについて、その詳細な推移を観測することができ、山頂でも特異的な挙動が観測された。また、このような BVOCs を起源とした有機系のアルデ

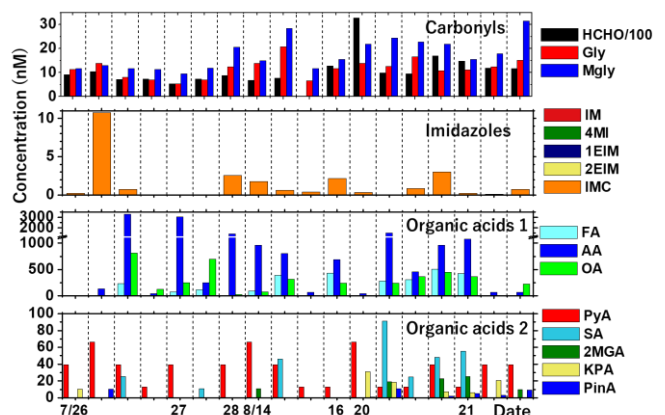


Fig. 2 Polar organic compounds observed from cloud water sampled on the summit of Mt. Fuji.

Gly: glyoxal, Mgly: methylglyoxal, IMC: imidazole carboxy, FA: formic acid, AA: acetic acid, PA: pyruvic acid, OA: oxalic acid, SA: succinic acid, 2MGA: 2-methylglyceric acid, KPA: ketopinic acid, PinA: pinonic acid. The bars for FA, AA, OA are minimized to be 1/10, and for HCHO 1/100.

ヒド、酸、ヘテロ環化合物が検出され、山岳域での粒子や雲の生成への関与が考えられる。また、山麓の自然起因の化合物が山頂の高層大気にも大きく関わっていることが見いだされた。

参考文献

- 1) Mitsuishi, K., Iwasaki, M., Takeuchi, M., Okochi, H., Kato, S., Ohira, S., Toda, K. (2018). Diurnal variations in partitioning of atmospheric glyoxal and methylglyoxal between gas and particles at the ground level and in the free troposphere. *ACS Earth Space Chem.*, **2**, 915-924.
- 2) Yu, G., Bayer, R., Galloway, M.M., Korshavn, K.J., Fry, C.G., Keutsch, F.N. (2011). Glyoxal in aqueous ammonium sulfate solutions: products, kinetics and hydration effects. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 6336-6342.

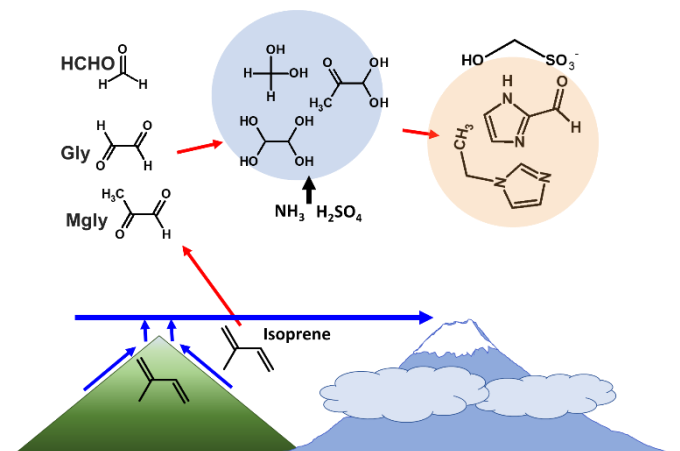


Fig. 3 Arrival of isoprene to Mt. Fuji and productions of polar compounds from isoprene.

富士山頂での火山性ガスの越冬観測

○加藤俊吾¹, 高橋智樹¹, 千島峻¹, 辰巳紘奨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 首都大学東京, 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おり, 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, 防災に役立つ。しかし, 大気微量成分の観測には消費電力が大きな大型の計測装置が必要であるため, 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 SO₂ ガスセンサーを用いて富士山頂でのリアルタイム通年観測を実現することを目指している。

2. 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, 越冬用の SO₂ の小電力測定には, Alphasense 社のガスセンサー (SO₂-B4) を用いた。実験室内での標準ガスを用いた性能評価では数 ppb までの低濃度の SO₂ の検出が可能であった。しかし, 実際の大気の観測で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 変動をしてしまい, 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 が検出された。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, 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 HALKA を用いた越冬観測 (2018 年夏～)

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。そのため, 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) を使用した。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。複数個のバッテリーを並

列に接続し, HALKA および SO₂ センサーに電源供給した。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, 2 日ほど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 (図)。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。

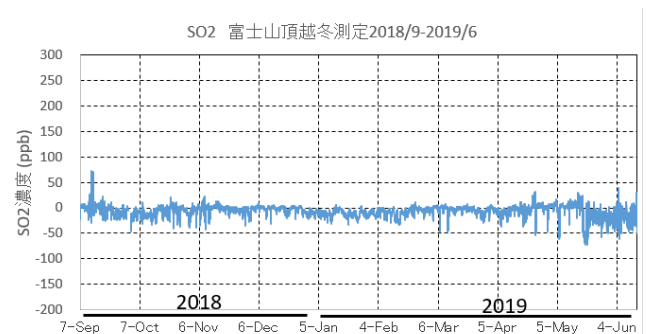


図 山頂越冬観測の SO₂ データ (2018/9-2019/6)

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 にガスセンサーの電圧出力を取り込んで通信できるようにした。2019 年夏の閉所時に SO₂ センサーに加えて火山ガスのより詳細な情報を得られる硫化水素 (H₂S) センサーも 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。現在のところ, 山頂の越冬システムは動作を継続しており, 測定データは以下の URL から確認できる。

<http://npo.fuji3776.net/info/H2S-monitoring2019.html>

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。



富士山頂での温室効果ガス濃度の観測事業

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、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2006-2008年に開発した。そのシステムを2009年夏期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。

また2017年からフラスコサンプリング(毎月、富士山頂の大気を自動でフラスコに採取し、得られた空気試料中温室効果ガス濃度とCO₂の同位体比を分析する)を開始した。

本報では、富士山測候所にCO₂濃度観測システムを設置してから、これまでの約10年間の富士山頂での温室効果ガス濃度の観測事業を報告する。

2. 気温と電圧

図1(a)に2012-2013年と2018-2019年のCO₂濃度検出部周辺の気温と室温の気温の関係を示した。両者は極めて高い正の相関関係にあり、両者の温度差はほぼ一定であった。ただし両者の差は、年々小さくなる傾向を示しており2012-2013年の両者の差は18.1°Cであったのに対し、2018-2019年の両者の差は15.5°Cであった(図1(b))。これはCO₂濃度検出部を覆っている断熱材の断熱効果が劣化している可能性が考えられる。

図1(c)に100個のバッテリーのボルト値を示した。2009-2016年の期間、越冬期間でバッテリーのボルト値は1.0-1.8V減少した。一方、2017年以降は越冬期間に減少するボルト値は、0.5-1.0であった。2016-2017年にバッテリーを新たなものに交換していることから、バッテリーの蓄電/放電能力に大きな個体差があることが分かった。

3. CO₂濃度

図2(a)に富士山頂、波照間、マウナロアのCO₂濃度を示した。富士山頂のCO₂濃度はマウナロアのCO₂濃度より夏期は5-10 ppm低く、冬期は5-15 ppm高かった。これは富士山頂がマウナロアよりアジア大陸に隣接しているため、アジア大陸の陸域での光合成によるCO₂吸収や呼吸によるCO₂放出、さらには人為的に排出されたCO₂の付加の影響を受

けたためだと考えられる。

図2(b)に富士山頂とマウナロアのCO₂濃度増加率とENSO Indexを示した。富士山頂のCO₂濃度増加率の周期性はマウナロアのCO₂濃度増加率の周期性と同様で、さらにENSO Indexとほぼ合致していた。したがって富士山頂のCO₂濃度の増加率は、エルニーニョ・ラニーニャ現象に大きな影響を受けていることが明らかとなった。

図2(c)に富士山頂、波照間、マウナロアの年間のCO₂濃度変動幅を示した。富士山頂のCO₂濃度変動幅は、マウナロアの変動幅より波照間の変動幅に近かった。

4. フラスコサンプリング

図3(a)と3(b)に富士山頂で実施した毎月のフラスコサンプリングで得られた空気試料中の温室効果ガス濃度と、CO₂濃度観測システムにより毎日計測された富士山頂のCO₂濃度の時系列図と散布図を示した。

富士山頂で実施したフラスコサンプリングは、越冬期間中、採取した空気試料を最大10カ月間、長期保管される。図3(a)と3(b)で示したようにフラスコサンプリングのCO₂濃度は、CO₂濃度観測システムのCO₂濃度とほとんど同じ値であったことから、フラスコサンプリングによって採取された大気試料は、安定的に保存されていたと考えられる。

図3(c)に富士山頂とマウナロアのCH₄・CO・N₂O濃度を示した。富士山頂の冬期のCH₄・CO濃度は、マウナロアのそれらより高かった。これは、富士山頂でのCH₄・CO濃度はアジア域での強いCH₄とCOの放出源を捉えているためだと考えられた。一方、富士山頂のN₂O濃度は、マウナロアのそれと同等であった。

5. おわりに

2009-2019年で富士山頂でのCO₂濃度の連続観測と毎月のフラスコサンプリングを安定的に実施する体制を整えた。本モニタリングで得られた観測結果から、アジア域でのCO₂の排出が停滞している可能性がみられた。今後も富士山頂での温室効果ガスのモニタリングを長期間継続させ、アジア域の炭素循環の変化を捉えていく予定である。

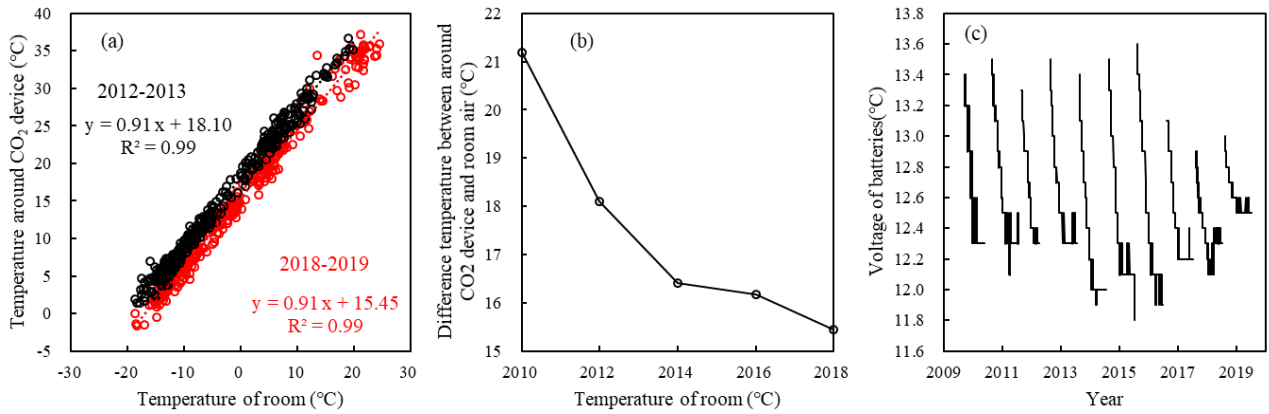


図 1. (a) 2012-2013 年と 2018-2019 年の CO₂ 濃度検出部周辺の気温と室内の気温の関係, (b) CO₂ 濃度検出部周辺の気温と室内の気温の差および (c) CO₂ 濃度観測システムのバッテリー 100 個の総電圧値

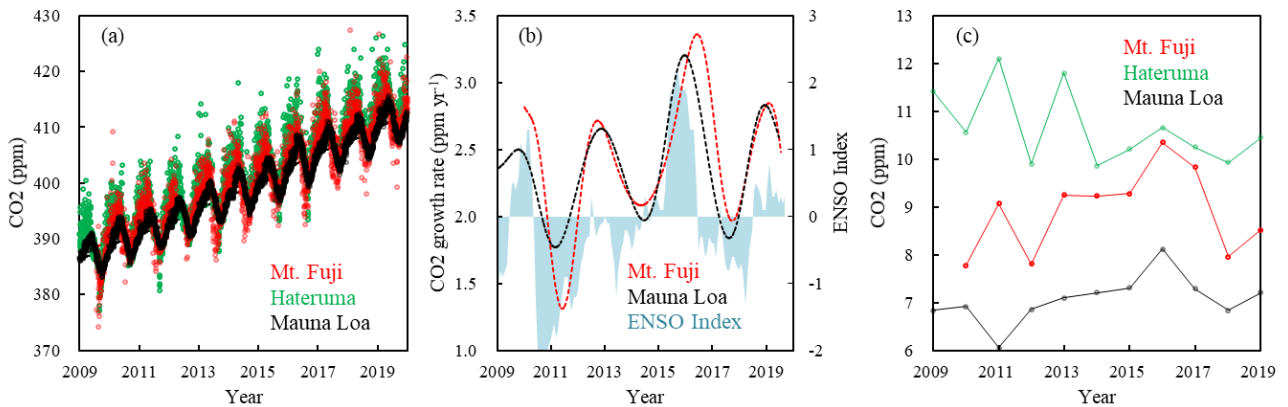


図 2. (a) 富士山頂, 波照間, マウナロアの CO₂ 濃度, (b) 富士山頂とマウナロアの CO₂ 濃度増加率と ENSO Index および (c) 富士山頂, 波照間, マウナロアの年間の CO₂ 濃度変動幅

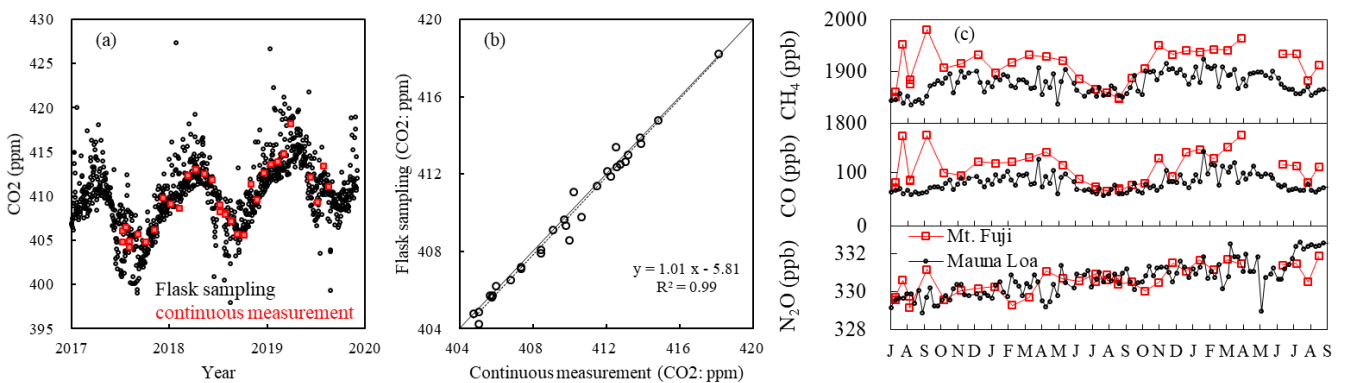


図 3. フラスコサンプリングと CO₂ 濃度観測システムにより測定された CO₂ 濃度の (a) 時系列図と (b) 散布図および (c) 富士山頂とマウナロアの CH₄, CO, N₂O 濃度

富士山頂の温室効果ガスの小型吸収ライダーによる観測

小林喬郎¹, 椎名達雄², 久世宏明², 矢吹正教³, 三浦和彦⁴
 1.福井大学, 2.千葉大学, 3. 京都大学, 4. 東京理科大学

1. はじめに

地球温暖化に関する温室効果ガスのレーザー計測法として3次元空間分布を計測する差分吸収方式ライダーが利用されている¹⁾。本研究では極めて小型の装置構成で、地面や回帰性反射板 (Retro-reflector) などハードターゲットを利用する差分吸収方式ライダーの開発を進めている²⁾。本報告では装置の動作特性を検証するため、富士山測候所付近の温室効果ガスメタン (CH₄) と火山性ガス硫化水素 (H₂S) の濃度変化を測定した結果を報告する³⁾。

ハワイ、マウナロア山では、温室効果ガスCO₂の長期観測が行われている。また、富士山頂の測候所では外部の大気を吸引してCO₂濃度の通年観測が国立環境研により実施されている。これらの結果は中緯度域の地球温暖化の研究に貴重な観測データを提供している。これに対してライダーセンサーは、外部の大気分子を直接的に広域の計測が可能となる。また、CO₂に次ぐ温室効果ガスのCH₄の同時観測も目指した。

2. 装置の構成とガスの検出特性

2.1 小型吸収方式ライダーの構成

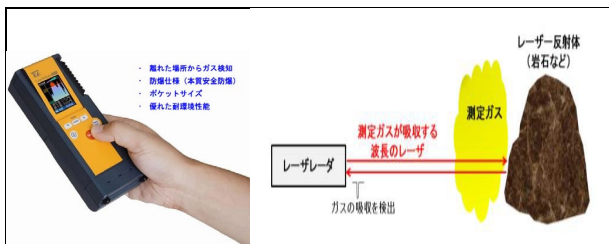


図1. 小型の吸収方式ライダーの概念図

図1に小型の吸収方式ライダーの外形と測定概念図を示す。小型・軽量のセンサー (アンリツ社、メタンミニ) で、地面や回帰性反射板にレーザー光を照射して光路中の分子吸収量を計測する。半導体レーザー (LD) の波長は 1.6537 μm、出力10mWで電池で長時間動作が可能である。路面や岩などの粗面散乱体では最大20mの距離で0.45 ppm・m の柱密度の大気中メタンの高感度検出が可能である。分子の吸収線の中心波長にLD波長を固定するため周波数変調 (FM) して、位相同期を行う検出法を用いる。

図2に光学系と位相同期検出系の構成を示す。LD光は反射板を通り粗面の散乱体に照射され、後方散乱光はレンズで集光して光検出器 (2) から位相検出回路 (Lock-in Amp (2)) で信号として利用される。また、LD光の一部は検出器

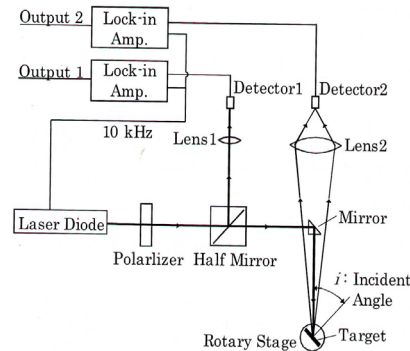


図2. 光学系と位相検出系の構成

(1)から位相検出回路 (1)を通り、LD波長を分子の吸収波長に固定する出力 (1)として用いられる。

2.2 回帰性反射板を利用する長光路吸収法の実験

レーザー送信光を反射させて効率的に元の位置に戻す反射体としてレトロ反射鏡や平面状のレトロ反射板が道路標識などに利用されている。そこで、レトロ反射板を用いて長光路の差分吸収分光法のDOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) の可能性を検討した⁴⁾。

図3にその装置の構成を示す。光ファイバーからの波長が1.6 μm付近の自然放出光 (ASE) を送信光として利用して、千葉市街の2.55kmの距離にレトロ反射板を設置し、その反射光を集光して分光器を通して吸収スペクトルを測定した。その結果、大気中のCO₂密度が360-450 ppmvの変化が測定された。また、水蒸気H₂OやHDOなど多数の分子が検出された。これらの結果、反射体を利用する長距離吸収分光計測法は微量ガスの検出感度が極めて高いことが判明した。

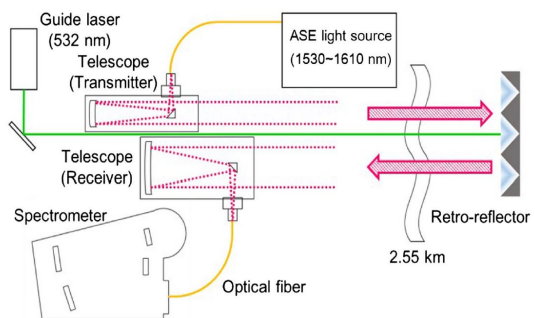


図3. 長光路・差分吸収分光 (DOAS) 装置の構成

3. 富士山頂での観測結果

3.1 メタンガスの測定

富士山測候所の外部の約10m離れた北側の土地に、小型吸収方式ライダーとレトロ反射板を三脚に乗せて26mの距離に配置して、メタンガス濃度を測定する実験を行った。

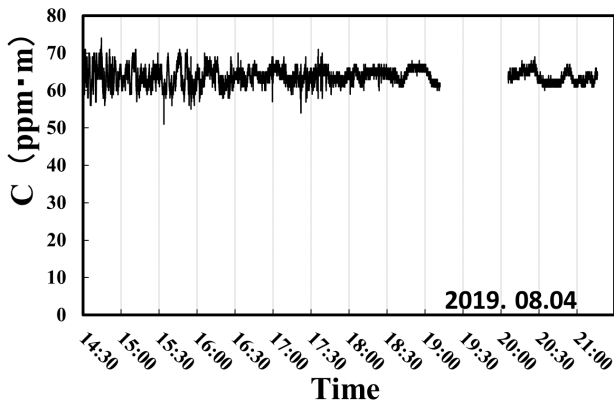


図4. メタン(CH₄)の柱密度の時間変化
(実験日: 2019年8月4日)

図4にその結果を示す。縦軸はメタンの柱密度 (Column Concentration) で、平均値の65ppm・m は往復の光路長52mから平均密度は1.25ppmとなり、この値は現状の世界の平均値とほぼ一致している。昼間の14時から18時頃までは密度の揺らぎが大きく、夜間に入ると変化が小さくなっている。なお、約19時から20時までのデータの欠損はPC電源の不具合に起因している。

3.2 硫化水素の柱密度の測定

また、硫化水素(H₂S)ガスを計測するレーザーセンサーはLDの中心波長1.5772μmで、数ppbレベルの高感度特性を目指して共同開発中の装置を用いた。

図5にメタンの測定と同じ光路長で行った硫化水素ガスの柱密度の測定結果を示す。測定時間は19時から21時まで1時間間隔で、最初の1分間の測定値を示している。柱密度値は200~350ppb・m、密度は3.8~5.4ppbで、時間と共に増加の傾向を示している。密度の変動は分散値が約10ppbであった。これらの値は標準セルを用いた今後の検証が必要である。

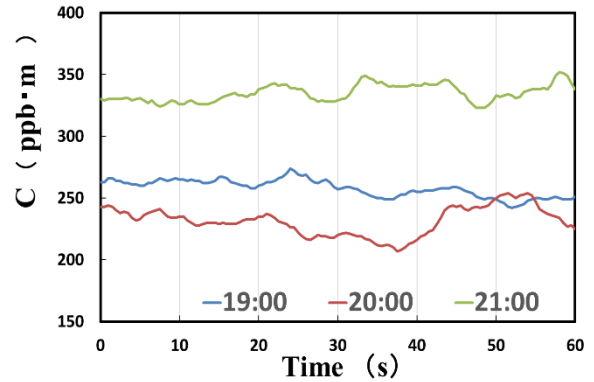


図5. 硫化水素(H₂S)の柱密度の時間変化
(測定時間: 19時~21時の最初の1分間)

4. 結言

以上の観測結果より、富士山の山頂付近の大気中のメタンと硫化水素の密度の時間変化などの測定が実現できた。光路長は26mと設定したが、数mでも測定が可能であった。小型で省電力の動作特性のため、富士山などの極域での観測への利用が可能であることが示された。今回は観測可能な日程が1日と制限されて十分なデータが得られなかったことが残念であった。

今後はこれらの小型吸収方式ライダーによる長光路での高感度測定や、CO₂を含む多種の分子の同時計測を実現することを目指して行きたい。

参考文献

- 1) 小林喬郎、杉本伸夫、久世宏明(2007). レーザー研究学会誌、33,5, 295-261.
- 2) 椎名達雄、小林喬郎(2014). メタンガス遠隔吸収センサーの最適波長変調法の検討. レーザーレーダー研究会、第32回予稿集、32,P-32, 102-103.
- 3) 小林喬郎、椎名達雄、久世宏明、矢吹正教、三浦和彦(2019). 小型・長光路吸収センサーによる温室効果分子の富士山頂での観測. レーザーセンシング学会、第37回シンポジウム予稿集、E-5, 121-122.
- 4) Saito H., Manago N., Kuriyama K., Kuze H., Near-infrared open-path measurement of CO₂ concentration in the urban atmosphere, *Optics Letter*, 40, 2568-2572.

富士山頂における大気電気・雷研究: 2019年成果概要

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。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。2019年では以下のテーマについて行った。前年度から次の4テーマを行った。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。



図1 ログスキーコイルを用いた測定。

2. 観測結果

1)については、2017年、2018年の不具合を解消するシステム(図1)し、無事に観測が終了した。2)の観測においては別稿で紹介しているが、山頂から遠方の地域で雷活動はみられたものの、スプライトが1事例取得できたのみであった。また、広域雷放電位置同定システム(Blitzortung)を山頂および御殿場基地(図2)にそれぞれ越冬期間(初期の研究者利用期間終了後の8月下旬のみ)および通年期間の導入し、極めて良好な機器運用が確認できた。3)については2019年の夏でも2018年に続き雷活動が活発でなかったことから明瞭な放射線の検知はできなかった(図3)。近年、雷雲の接近が減っており、ほとんど事例が得られなくなっている。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4)。安定した良好なデータが得られた。

前述いずれの成果も、別稿にて詳細な紹介しているので参照していただきたい。

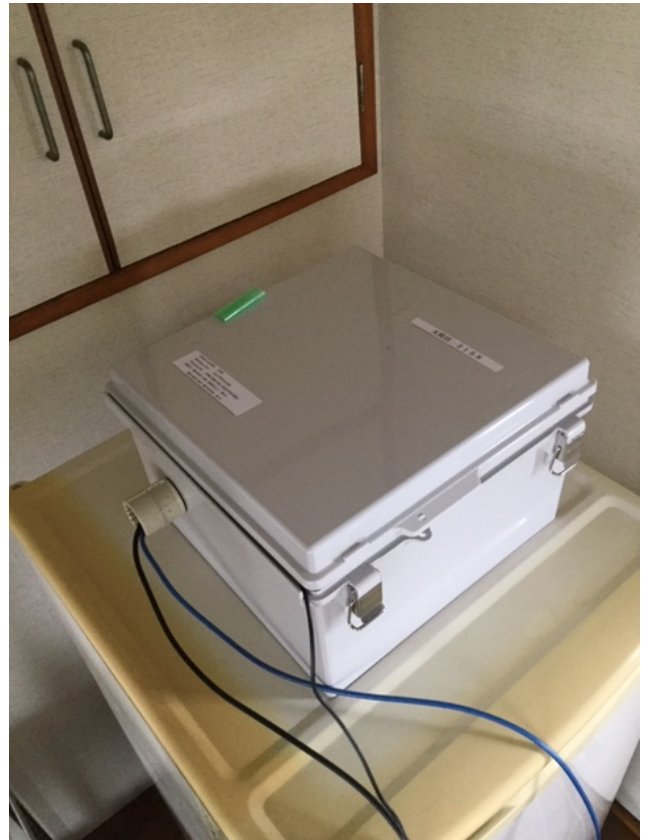


図2 御殿場基地に設置した雷測定機器。



図3 放射線測定機器(GROWTH).



図4 大気電場測定機器

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

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, 3. 弘前大

1. はじめに

富士山測候所(以下, 測候所)の電源は, 山麓から高压ケーブルを引き込んで得ている. 高压ケーブル内に電源供給の高压線と対に接地線があり, この接地線は山麓の接地極に繋がっている. このことに着目し, 測候所の直撃雷が観測できると考え 2013 年に測定を開始した. この年の観測期間には落雷が無かったが周辺雷による電流が観測された. 以降はこの周辺雷現象により流れる電流も観測している. しかし, 雷頻度に比較し観測できる雷信号電流頻度は著しく小さかった. この原因は, オフセットによる電流変動が大きくてトリガーレベルを超えてしまい測定できなくなるという現象によるものであった. その後, その対策をすることで高い測定頻度が得られるようになっていた. 開発を通じて本観測装置がかなりの高感度が得られることも分かってきた. 例えば, 当初はゼロレベルの変動は回路に起因するものと考えていたが, 雷雲との静電誘導によるものが支配的で, 測定系が雷雲による電界変化を高感度で捉えていることも分かった. 本報告は, 今までの開発経過で明らかになったことを報告し, 及び今後どのように進めるべきかを提案する.

2. 接地線電流の測定方法

図1は測候所引き込み高压ケーブルの構成を示している.

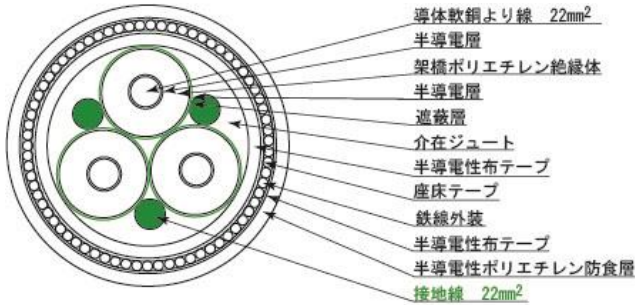


図1 富士山測候所引き込み高压ケーブルの構成
架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル

高压ケーブルは測候所内に引き込まれ, 内蔵接地線は端末より引き出され測候所共通接地極に接続されている. 他方の端末は山麓側の接地極に繋がっている. 従って, もし測候所が被雷すれば雷電流はこの高压ケーブル内蔵接地線を通して山麓側に流れる. このことに着目してこの高压ケーブルにログウスキーコイル電流検出器を取り付け, 流れる電流を測定できるようにした. 因みにログウスキーコイルは軸方向の磁場には感応せず接地線に電流が流れることにより生じる周方向の磁場のみで感応するようになっている. 山麓

に繋がる接地系統は, 併設された接地線及び測候所接地が複数になるため, 高压ケーブルの内蔵接地線の電流を校正して直撃雷電流が求まるようにする必要がある.

直撃雷電流測定用に用いたログウスキーコイル電流検出器の基本回路を図2に示す. ログウスキーコイル出力電圧は, 高压ケーブルに流れる電流が作る周方向磁束の微分値に比例する. 従って, 電流に比例する出力電圧を得るために積分回路を通す回路構成にしている. 出力電圧は図中の式になり高压ケーブル内接地線に流れる電流に比例した値になる. 直撃雷電流は大きいいため, 感度を落とし, 高压ケーブルとログウスキーコイルの相互インダクタンスは $0.01 \mu\text{H}$ とした. 電流計出力電圧の接地線電流への換算は図中の式に設計値を代入し求めている.

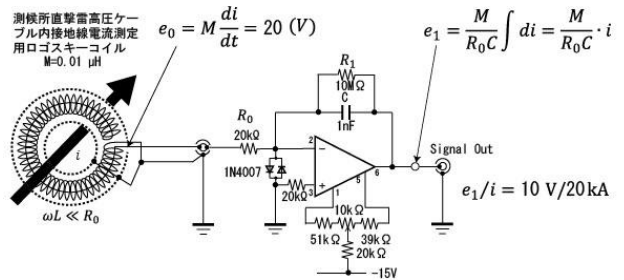


図2 測候所直撃雷電流測定用ログウスキーコイル電流計

一方周辺雷用のログウスキーコイル電流計は, 図3に示す回路構成で基本回路は直撃雷電流測定用と同じである. しかし周辺雷現象による電流は小さくなるため, 感度を大きくしている. 例えば高压ケーブルとログウスキーコイルの相互インダクタンスは $0.2 \mu\text{H}$ にしている. このため直撃雷があった場合, ログウスキーコイル出力電圧は過大な電圧になり回路を破損させる. これを防止するためログウスキーコイル出力に低静電容量の避雷器(ネオン管で代用)を設けることで保護するようになっている.

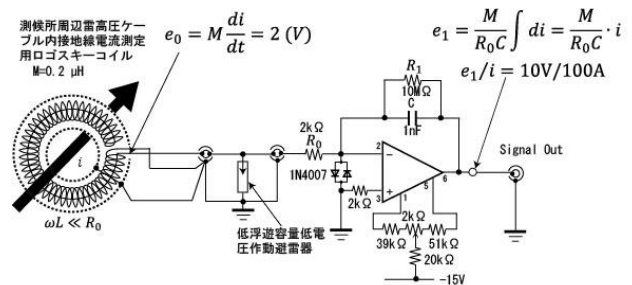


図3 周辺雷接地線電流測定用ログウスキーコイル電流計

最初に用いたトリガー回路は, いずれの極性でも動作するように絶対値回路のみを通してトリガーに使用していた. し

かし、オフセットの影響が無視できず、安定な測定ができなかった。この欠点は、トリガー回路には AC 結合を導入することで解決した。

接地線電流測定系は当初は測候所被雷電流のみを考えた1系統の電流測定であった。現在は直撃雷電流に加えて周辺の雷現象によって流れる電流と雷現象間の相関を見るため4台のデジタルストレージオシロスコープ(以下、DSO)で測定するようになっている。

昨年の夏期測定では測定系は図4の構成で測定した。DSO-1 は測候所が被雷した時の雷電流を観測するよう、直撃雷と認められる十分高い一定レベルの電流(200 A)でトリガーされるようになっている。もし上向き雷であった場合、前兆現象が観測された経緯があり、その現象も捉えて DSO-2 に記録されるようにしている。

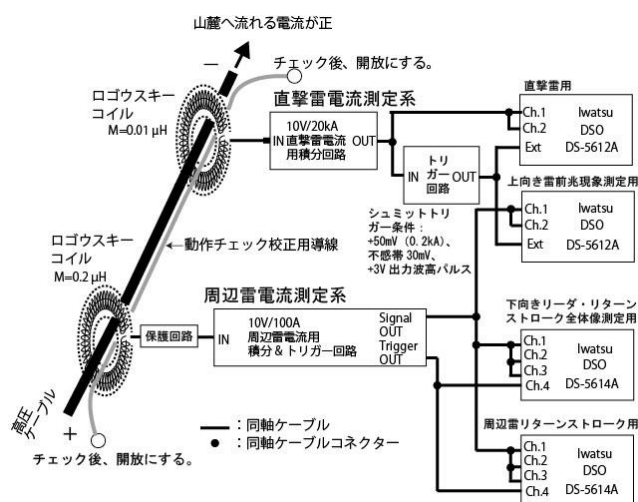


図4 2019年度接地線電流測定系

DSO-3 は前兆現象とリターンストロークの全体像を明らかにするため、100 ms の長時間測定で、且つ十分な分解能が得られるようにするため100 kptsで測定している。DSO-4は、周辺雷のリターンストロークを観測することを目的にした。しかし、昨年度は多数の雷現象をとらえたが、感度を高めたことが災いして前兆現象の小さな放電電流を多数捉えたものの、続いて起きるリターンストローク電流迄の測定にならず、リターンストロークの測定頻度は小さい。

各 DSO の設定条件を図5に示す。電流計出力電圧測定は、DSO を使用しているが、1チャンネルの分解能は8 bit である。高分解能を得るため DSO の2ないし3チャンネルを同一信号の測定に使用し、小信号を明確にとらえた。例えば、3チャンネルを使用する場合2 V/div. (20 A/div.), 500 mV/div. (5 A/div.) 及び100 mV/div. (1 A/div.)を割り当てることで、小信号では0.4 mV (4 mA)の高分解能を得ている。

2019年に測定した各DSOのトリガー条件と測定時間を図5に示す。オフセットの影響が受けないようにDSO入力の各信号及びそのトリガー信号は、全てAC結合とした。DSO-1及びDSO-2のトリガーは、Ext10トリガーを使用するため、ト

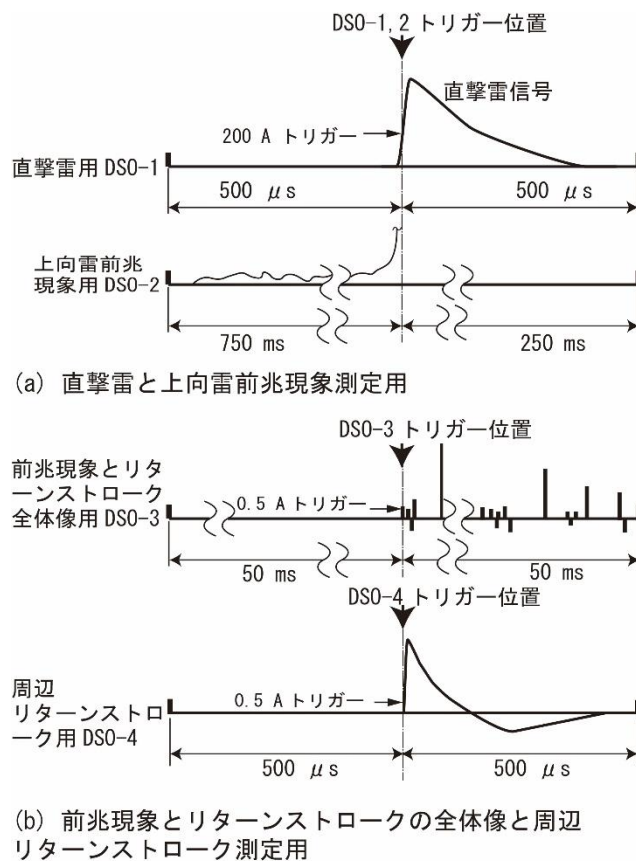


図5 2019年接地線電流測定用DSOの信号トリガーレベル・位置と測定時間幅

リガー条件を超える信号に対しシュミットトリガー回路で必要条件のパルスを作り加えている。いずれの測定系もAC結合(カットオフ周波数7.5 Hz)を使用しているため、10 Hz以下の周波数成分の測定は困難になる。積分回路の時定数CRは、0.01 sである。

DSOの測定結果は、ロギング機能によりUSBメモリーに記録するようになっている。この記録中は、DSOの測定はできず、デッドタイムになる。デッドタイムは、相関関係のある現象間の時間が測定時間より小さくなる場合および現象の頻度が小さくランダムであれば無視できる。しかし、雷現象が頻発する場合、デッドタイムにより測定できなくなる雷現象は多くなる。雷雲が来た場合、落雷現象の発生頻度は高く、デッドタイムにより測定できなくなるものが多くなる。

3. 接地線電流を流す雷現象

雷現象により接地線に流れる電流は、直撃雷電流、雷放電路との電磁結合、測候所電極捕集電流(以下、捕集電流)、雷雲電荷変化による静電誘導電流、及び山麓からの雷逆流電流の五つが考えられている。接地線の電流 i_{DL} は、複数の現象による電流が重畳している場合が一般的で、全ての現象が重畳した場合、次式で表される。このうち i_{DL} 、 i_c 、 i_{bf} はいずれか一つであり、それと i_{EMI} 及び i_i の三つの現

象の重量が一般的である。

$$i_{gw} = i_{DL} + i_{EMI} + i_c + i_i + i_{bf} \quad (1)$$

i_{DL} : 直撃雷電流, i_{EMI} : 電磁誘導電流, i_c : 捕集電流, i_i :

静電誘導電流, i_{bf} : 山麓からの逆流

ここでは雷現象がどのように接地線に電流を流すか説明する。

3-1 測候所直撃雷

測候所が被雷した場合、落雷電流は測候所接地極から山体を通して大地に流れる電流と測候所の共通接地極と山麓側接地極を繋ぐ接地線に流れる電流がある(図6)。前者の接地抵抗は山麓側接地抵抗よりも1桁以上大きいいため山麓側に繋がる接地線に大半が流れている。しかしその接地線は複数あり、高压ケーブル内接地線はその一つである。被雷電流測定は高压ケーブルにログウスキーコイルを置いて一部を測定することになるため、被雷全電流は校正して求める必要がある。

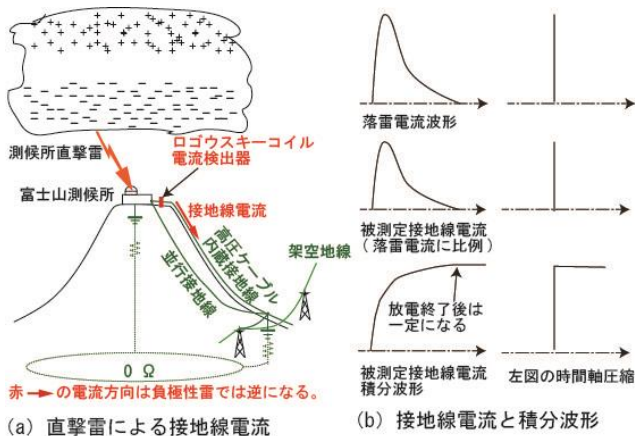


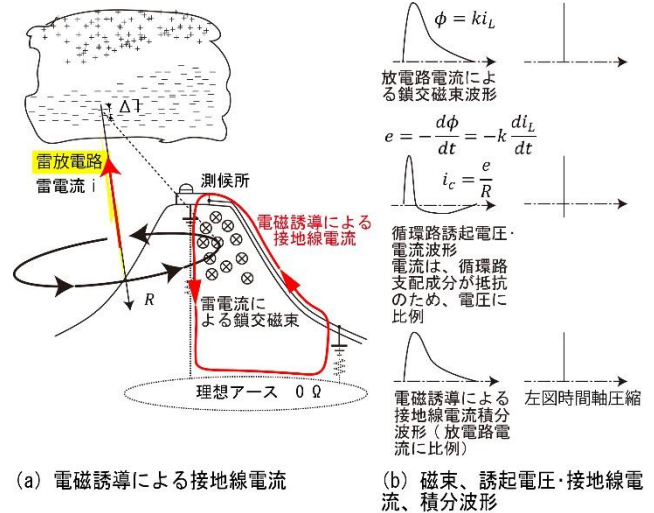
図6 測候所直撃雷電流

直撃雷電流の校正方法は二つ考えられる。一つは、測候所に、測候所全体を保護下に置くことができるとともに測候所の被雷個所が一ヶ所に集まるように工夫した避雷針を設け、被雷電流を絶対測定し、被測定高压ケーブル接地線電流を校正する方法である。精度の高い校正が可能になる。これは測候所の耐雷脆弱個所を保護することにもなる。もう一つは、落雷情報より測候所直撃雷位置の落雷電流を知り校正する方法である。この場合の誤差は落雷情報の電流測定精度で決まることになる。

校正の実現で正確な被雷電流を求めることができ、測定電流パルス波形の時間積分により落雷放電電荷量も求められる。この校正值は、電磁誘導以外は電流信号源から見て同一の回路構成になるため、同じとして適用できる。また山体抵抗が大きいため、電磁誘導電流も近似的に適用可能と考えている。

3-2 雷放電路との電磁結合

図7に示す測候所接地線と山体が作る循環路の電磁誘



(a) 電磁誘導による接地線電流

(b) 磁束、誘起電圧・接地線電流、積分波形

図7 電磁誘導による接地線電流（測候所西側の負極性雷の場合）

導電率は、被測定雷現象の雷放電路電流が作る磁束の中でその循環路と鎖交する磁束を微分したものになる。循環路のインピーダンスは山体抵抗が支配的になるため、接地線電流は、雷放電路電流微分値に比例し、以下の特徴が現れる。

- ① 測定電流の積分値が雷放電路電流に比例したものになる。
- ② 放電終了後積分値は0になる。電磁結合の影響を知る指標になる。
- ③ 測定電流積分値のパルス幅時間は放電持続時間になり、そのパルスの積分量が放電電荷量に比例する。
- ④ 雷放電路が鉛直の場合、落雷位置によって山麓に繋がる接地線ループの鎖交磁束方向変換線より東側にある落雷位置の負極性雷の初期ピークは正に、西側にある落雷位置の初期ピークは負に変わる。一昨年の測定からこの鎖交磁束方向変換線は以下の式を得ている。

$$y = 1.98x - 3.54 \quad (2)$$

実効的接地線位置は、測候所を通り鎖交磁束変換線に直角に交わる以下の式で表される。

$$y = -0.506x \quad (3)$$

今後観測を蓄積することでさらに精度の高い鎖交磁束方向変換線を求めていくことが必要である。

落雷放電路の位置や方向によって感度は変化する。落雷放電路を鉛直であると仮定することで落雷情報から得た落雷位置と電流の情報を測定電流と比較することで、落雷位置による電流検出感度を定量化できる。また等価的な循環路の位置と断面積も決定可能になると考えている。精度を高めるため、データの蓄積が必要である。

雲上部が正極で下部が負極の上下間の雲放電の場合、正極性として現れる。スプライトで流れる電流は、正極性雷雲から始まるとすれば負極性落雷電流と同一方向であり、位置による電磁誘導による波形の極性も同一である。検出

系が高感度であることから、かなり遠方のものまで測定可能になると推測される。

3-3 測候所電極捕集電流

図8に示すように富士山に落雷した電流を測候所に集め接地線を通し山麓に流れる電流である。測候所電位は、接地線で山麓と繋がっているため、山麓電位である。富士山の被雷個所の電位は、一般的に山体抵抗が十分小さくないため、著しく上昇する。測候所との電位差により被雷点から測候所に両者間の抵抗で除した電流が流れることになる。接地線の電流極性は、負極性落雷では負に、正極性落雷では正になる。測候所側の捕集電流は遠方になると小さくなり大地への拡散を考えるとほぼ距離の2乗に反比例するものと考えられる。以下の特徴がある。

- ① この電流は放電持続時間で終了する。
- ② 雷放電時間の積分値で一定になる。従って時間軸を圧縮するとステップ状の変化になる。
- ③ 電流極性は、負(正)極性落雷の場合、負(正)になる。

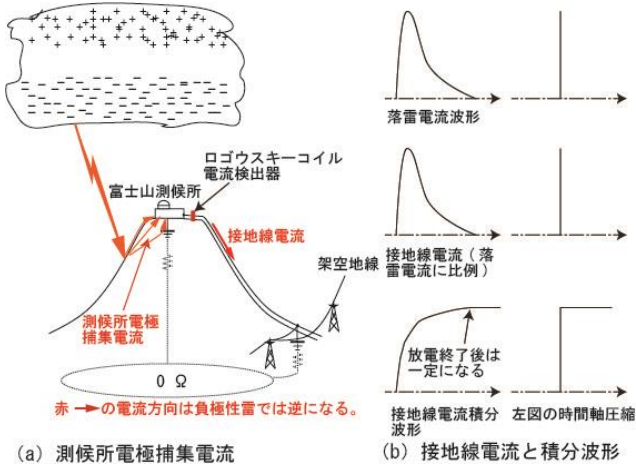


図8 測候所電極捕集電流

3-4 雷雲電荷変化による静電誘導電流

3776 mにある測候所という大面積(南北約50 m×東西約25 m)の風電極と上空の雷雲との等価結合容量を考えると、図9に示す雷雲の移動、雲放電や落雷による雷雲の電荷変化により、測候所の電界が変化し、次式で表される静電誘導電流が山麓接地極と繋がる接地線に流れる。

$$i_i = S \epsilon_s \epsilon_0 \frac{d}{dt} E_s \quad (4)$$

ここで、 i_i : 静電誘導電流、 S : 測候所等価表面積、 E_s : 測候所表面電界、 ϵ_0 : 真空中の誘電率、 ϵ_s : 測候所周囲大気との比誘電率、である。

式中の S は概数として知ることができるので、接地線電流測定系は、十分応答性の高い電界測定器により絶対測定した電界により誘導電荷量を求めることができる。電界の時間変化で校正することにより測候所表面の電界変化率検出器としても利用できる。電界変化率を時間積分することで電界を求めることが可能である。長期の絶対的安定性は確保で

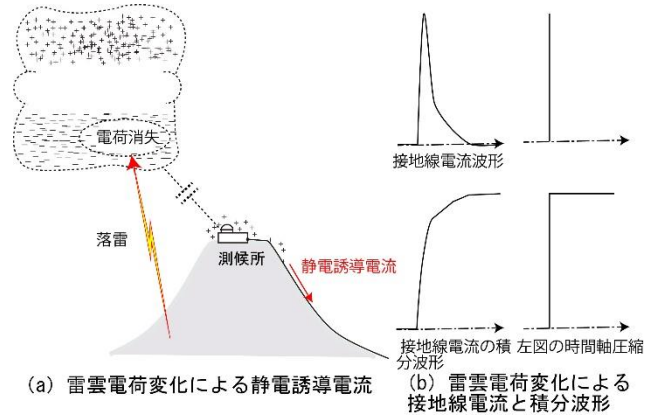


図9 雷雲電荷変化による静電誘導電流

きず、基準電界を決めるには、絶対測定が可能な電界測定器の併用が必要になる。

この静電誘導電流は以下の特徴がある。

- ① 放電初期、電荷消失が急激になるため、雷雲電荷による静電誘導電流波形は立ち上がり時に鋭く反映する。しかし、放電時の変化は、小さくなり、重畳する電磁誘導電流に埋没し分離しにくくなる。
- ② 放電後雷雲電荷の変化は小さくなり測定静電誘導電流変化が明確に現れないが、測定電流を積分することで放電時にステップ状変化が現れ見えるようになる。
- ③ 雷雲の移動が無視でき放電後の雷雲電荷が一定で変化が無い場合は、静電誘導電流が0になるため、積分値は変化せず一定になる。なお変化がある場合が一般的であり、その時、使用電流計積分回路の放電時定数より十分速い変化であれば、時定数($CR = 0.01$ s)による誤差混入は小さくなる。
- ④ 誘導電流の積分値から雷雲による測候所の誘導電荷量を求めることができる。

3-5 山麓からの雷逆流電流

この逆流電流は、図10に示すように山麓側に落雷することで接地線電位を上昇させ、測候所接地抵抗から散逸し大地に流れる、測候所に逆流する電流である。山麓側接地線

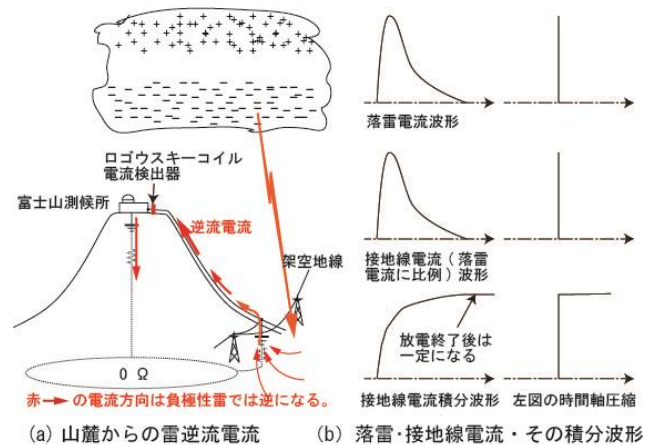


図10 山麓からの雷逆流電流の等価回路

の電位は被雷等により上昇すると測候所の電位も同じ電位になり、測候所接地極より富士山体に散逸する電流が流れる。この電流の積分値は、放電終了後最大になり一定になる。時間軸を圧縮した場合、負極性雷は正のステップ状変化として重畳する。

山麓側の架空地線等の接地系統が被雷した場合、接地線電位上昇は遠方でも影響があり、測候所に逆流する電流を流すことになると推測される。また、山麓接地系統が作る循環路の誘起電圧による電流も考えられるが、測定個所がこの循環路に入らないことからこの電流は小さく、測定結果には現れないと考えられる。大地や独立の接地体系への落雷は、他の接地系統への影響は小さく電位上昇を小さくするため、遠方では検出できなくなると推測できる。この逆流電流は、山麓での測定も可能にすることで、より詳細な挙動が解明できるようになると考えている。

空間と接地線線路との到達時間差は、例えば空間と接地線上の電磁波伝播速度を 3×10^8 m/s と 2.5×10^8 m/s とすれば、伝播線路長が空間直線距離の 1.5 倍、落雷位置が測候所から 20 km の位置として、約 50 μ s になる。逆流現象を考える上で、時間差の考慮も必要である。

逆流電流の特徴は以下ようになる。

- ① この電流は放電持続時間で終了する。
- ② 雷放電電流の積分値は、放電時間と共に増加し、放電終了で最大値になり、その後一定になる。
- ③ 山麓側接地系統の被雷による電位上昇で測候所に流れる電流である。
- ④ 山麓架空視線の被雷は遠方でも検出する。
- ⑤ 電磁誘導電流と重畳する。両者の波形には伝播時間差の影響が生じる。
- ⑥ 負(正)極性落雷の場合、測定電流は正(負)になる。
- ⑦ 山麓接地極がある東側の落雷で大きく現れ、西側では無視できる大きさになると推測される。

4. 測定結果および現状の性能と問題点

4-1 2019 年測定結果

図4の周辺雷電流測定系の周辺雷リターンストローク用 DSO-4 には、雷現象により接地線に流れる多数の電流が測定された。一方で、トリガーレベルを下げたことで雷現象による小さな電流パルスで動作し、本来目的としたリターンストロークの記録がデッドタイムに入り、測定できなくなっている。もしこれが十分測定できていれば、他の落雷位置と雷電流の落雷情報とを考慮合わせることで、雷現象測定器としてのより正確な特性評価が可能になる。次回測定ではリターンストローク測定のため、トリガーレベルを 200 mV (2A) に上げる必要がある。また、測定時間は、リターンストローク全体像の測定が可能のように 200 μ s/div. に変更することが好ましい。

以下は、周辺雷電流測定系の下向き雷のリーダとリター

ンストローク全体像測定用測定系 DSO-3 で観測されたものである。

(1) 停電前 2019 年 7 月 23 日 01:20:19 観測例(図 11) 接地線電流測定だけでは高圧電源の漏洩電流は分らない。

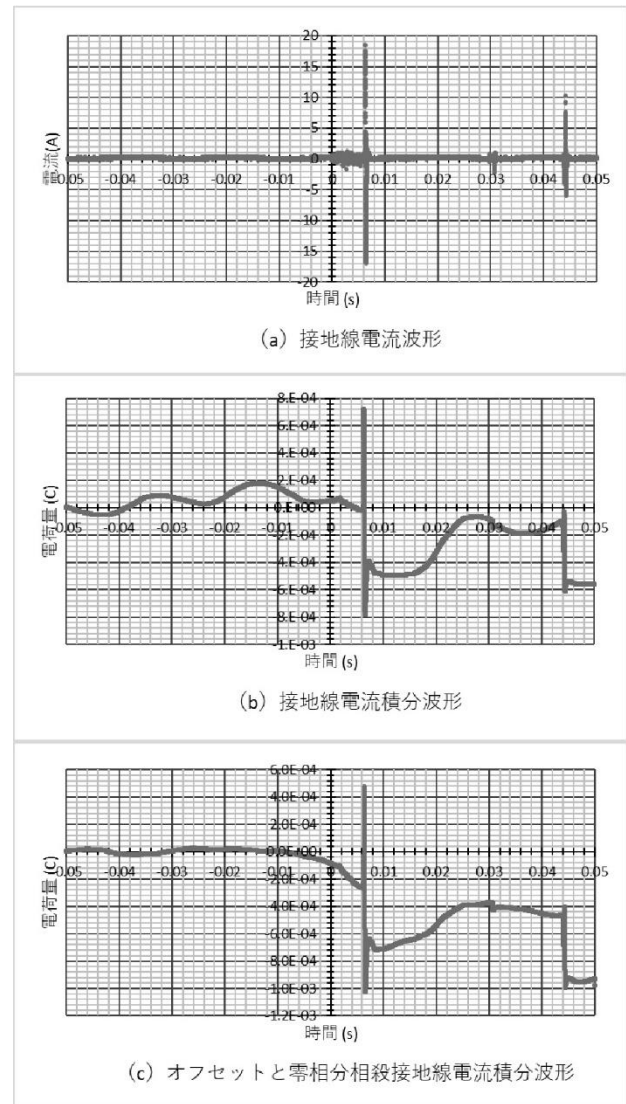


図 11 2019 年 7 月 23 日 01:20:19 観測波形

測定した接地線電流を積分することで零相電流が見えてくる。また複数の雷現象により誘起される電流も見えるようになっている。例えば、0 ms~6 ms の前兆現象での変化は接地線電流ではステップリーダが観測され積分値からは静電誘導電流が観測されている。6 ms のリターンストロークパルスは、測候所周辺に落雷があり負極性雷であれば、その捕集電流が測候所から接地線を通して山麓に流れていることを示している。31 ms 付近の変化は接地線電流とその積分波形から雷雲での小さな放電と静電誘導が重畳した変化と読み取ることができる。44 ms 付近の変化はリターンストロークと捕集電流が測定され、前者は結合が小さいため小さくなっていると考えられる。また短い時間で前兆現象もあり、2 重落雷と考えられる。

(2) 停電時 2019 年 7 月 23 日 01:23:02 観測例(図 12) 停電は、第 1 柱にあるキュービクルの地絡継電器が動作し遮断器が動作し生じたものである。図 12 は地絡継電器が動作時に測定された高圧ケーブルに流れた電流である。この電流は被雷によるものである可能性は高いと考えているが、地絡継電器を動作させた電流とどのように関係するかはまだ不明である。接地線に被雷電流が流れた場合、接地線の特性インピーダンスにより大きな電位になるが、接地線と高圧電源線との結合が十分で無い状態があり、高圧ケーブルが長い(約 7 km)ことから両者に大きな電位差が生じたことにより動作地絡電流が流れたものではないかと推測している。

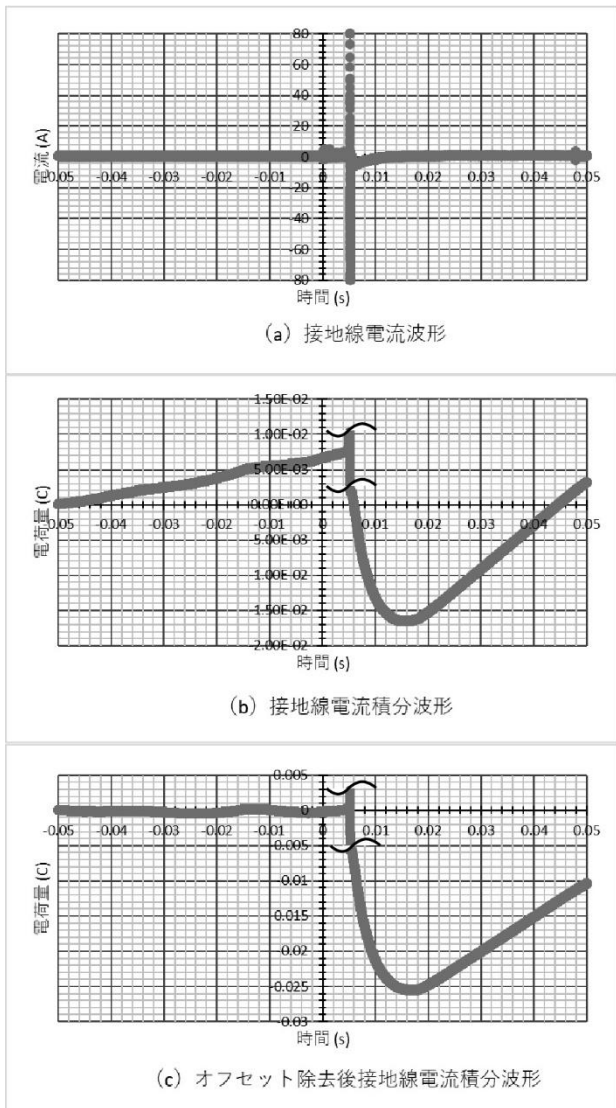


図 12 2019 年 7 月 23 日 01:23:02 観測波形

0~5 ms に現れた前兆現象は、拡大した場合、正の電流が流れ測候所表面電界が減少していることを示しており、ステップリーダと思われる電磁結合による電流が頻発して観測されている。リターンストロークと推測されるインパルス状電流は DSO-3 の測定範囲を超えているが、直撃雷電流測定系では動作するトリガーレベルまで達していない。

引き続生じている変化は、高圧電源遮断により高圧ケーブルの充電電流が流れたことにより生じたものと推測される。(3) 停電中 2019 年 7 月 23 日 01:23:50 観測例(図 13) 図は停電中に観測された接地線電流とその積分波形である。零相電流の影響は現れていない。もし測候所電源が高圧ケーブルから供給を受けない状態であれば、零相電流の影響は受けず測定結果のデータ処理も大幅に少なくなることになる。

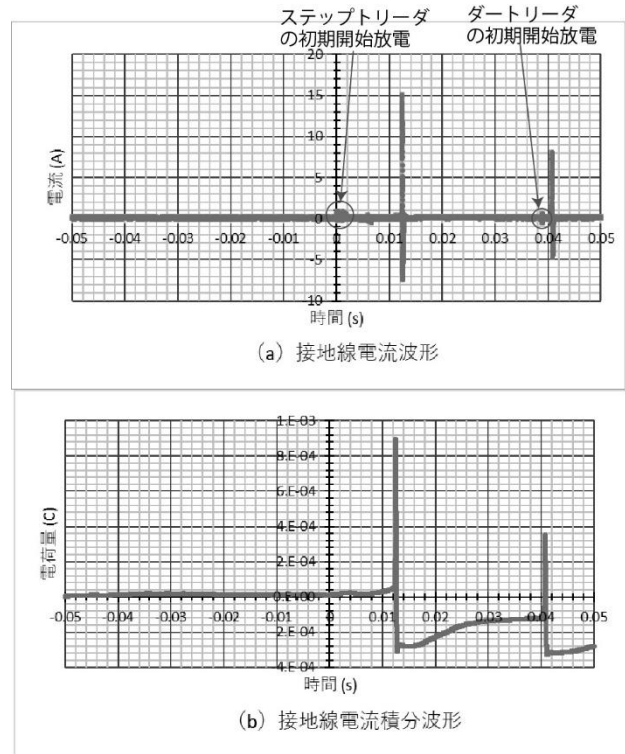


図 13 2019 年 7 月 23 日 01:23:50 観測波形

測定結果は、電磁結合による電流、捕集電流、及び雷雲の静電誘導電流の三つが重畳したものと推測される。最初の落雷のステップリーダと 2 番目の落雷のダートリーダの初期開始放電が観測されている。この前兆現象は他の観測例でも観測される傾向がある。0~12 ms の区間では、図では小さいが静電誘導の影響が見られる。積分値から 12 ms の位置のリターンストロークは、電磁結合による電流と捕集電流が重畳したものである。その位置から正方向への変化は積分回路の時定数による減衰と考えられる。2 番目のリターンストロークの形状が 1 番目と相似していることから、同じ放電路でリターンストロークがあったと考えられ、2 重落雷と推測される。

4-2 今迄の測定で得られている一般的な傾向

(1) 積分で分かる情報 接地線電流を積分することで、電磁誘導による電流は、放電路の雷電流に比例する電流が求められる。また時間圧縮した場合、捕集電流や静電誘導がリターンストローク時の大きな電荷量変化がステップ状変化になる。電磁誘導以外との現象の識別が可能になる。例

例えば測候所電極捕集電流、及び逆流電流は、落雷極性の落雷時の変化になるのでステップ状の変化を伴う。変化の極性から落雷の極性や流す現象が何なのか知ることができる。

(2) 進展せず消滅する放電 観測された雷現象はリーダ、雲間放電や落雷と認められる放電だけではなく進展せずに消滅してしまう小さな放電が多数あることが分かった。

(3) 無視できないデッドタイム 測定の都度 USB メモリーに記録する方法を採用しているため、この記録時間中はデッドタイムとなり測定できない。これが 1~2秒あるため、その時間の雷現象は捉えることができず見落とすことになる。また測定時間を小さくとると測定時間以上の従属現象は捉えることができなくなる。見かけ上、従属現象は測定できないことになる。雷現象が頻発する場合無視できない。

2019 年測定ではトリガーレベルを小さくしたことで、小さな放電の頻度が多く、従属する大きな放電が測定できない場合が多く生じたと推測される。このことからトリガーレベルの設定で考慮すべきは以下の点である。

・遠方では前兆現象であるリーダの小さな放電は測定に掛からなくなるので大きな放電だけに着目すればよい。

・測候所近傍の雷現象は前兆現象の信号が大きく前兆現象によりトリガーが掛かるため、リターンストロークまでの全体像を測定できる別の測定時間 100 ms の測定系で測定する。

(4) ステップリーダ進展に伴う静電誘導電流変化 ステップリーダの進展に伴い接地線電流は正に増加する傾向があり、雷雲電荷は見掛け上減少傾向にあることになる。測候所の正の誘導電荷量は、山麓側に移動し、小さくなる傾向があることを示していることになる。

(5) ステップリーダに伴う現象 負極性リターンストロークの前兆現象に見られる特徴として雷放電路電流との電磁結合による同一極性の小パルス電流が頻発し、雷雲電荷変化も生じて正の静電誘導電流が観測される。測定結果からこの現象は見掛け上雷雲電荷が小さくなることを示している。ステップリーダの進展過程は線状放電路に電荷を集め蓄積され線状端に高電界が生じることで線状に延びていくことを示していること、またこの中には発展できずに消失してしまうものがあることが推測される。

(6) 複数現象が重畳 重畳する複数の現象を同時に高感度で測定できる結果、雷現象を理解する有益な情報が得られるようになってきている。負極性のリーダが測候所に対抗する場合、誘導電荷は正電荷で大きくなるため、誘導電流は負の方向になると推測される。しかし直撃雷以外のリーダは測候所以外に進展するため、雷雲そのものの見掛け上の電荷は少なくなる。そのためその影響を受ける静電誘導電流は一般的に正方向に流れ、ステップリーダには静電誘導電流が増加する傾向が見られると考えられる。

5. 今後の進め方

5-1 観測漏れの防止対策

DSO の観測ではトリガーにより測定を開始すると測定時間とその後の記録時間はトリガーを受け付けない。雷現象が頻発する場合、雷現象がデッドタイム、即ち記録時間に入る可能性は大きくなり、その場合その雷現象は測定できなくなる。信号電圧及び記録時間共に高分解能が得られ連続記録が可能なデジタルレコーダがあればデッドタイムは生じなくなる。しかし必要な観測信号の分解能と記録時間分解能を満足させるとなると導入費用はかなり大きくなると推測している。

別の方法として、観測に必要な最小信号レベル以上の雷現象のみを観測可能にすることであれば、最小信号レベル以上の入力で動作し、測定時間は相関がある雷現象の電流測定が十分可能なできるだけ長時間測定ができ、デッドタイムになる時間は別の測定器にボタンタッチすることで実質的なデッドタイムを無くすることができる。実現方法は図 14 に示すようにすることで可能になると考えている。できるだけ長時間測定ができ、且つ記録時間、即ちデッドタイムが小さな測定器が必要になる。それらがどのようになるかによって、ある一定レベル以上の信号に対してデッドタイムの影響を無くす測定器 (DSO を考えている) の使用台数が決まる。

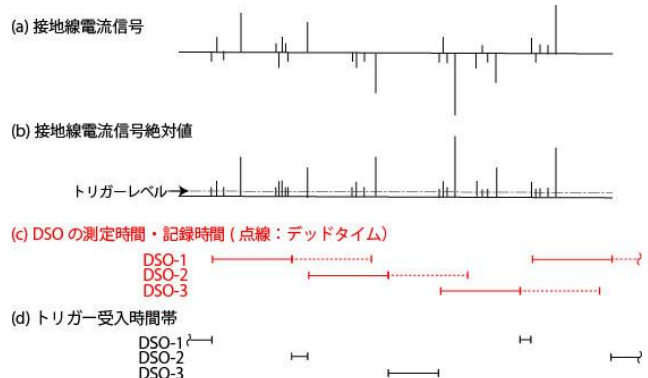


図 14 デッドタイムの無い測定方法例

5-2 データ処理方法

処理データ量が大きくなるため、人力に頼らないデータ処理方法の確立が必要である。人力ではデータ処理はエクセルに変換してから行うことになる。データが 1 kpts の場合、人力でもスムーズに処理できるが、100 kpts になると 100 倍以上の時間がかかる。データ量は多くなっているため人力では実質データ処理は行えない。必要と思われるものを選択して処理する以外にない。取得したデータ全体の処理はデータ処理のアルゴリズムを決定しプログラム化して自動処理できるようにすることが必要である。今回の処理手順は以下のようにして行った。

① 各チャンネルに記録される採用データは測定範囲を超えない最大値のチャンネルのものを採用している。

- ② オフセットは最初の「全 pts×4/10」(以下, 除去調整区間)の平均値を全体から差し引く.
- ③ 積分処理をする.
- ④ 積分しても偏りが残るのでさらにオフセットの調整をする.
- ⑤ 零相電流が重畳しているので, 重畳分を求めて差し引くことになる. 以下の手順で行うことになる.
- ⑥ 50Hz 正弦波の振幅 A_m は除去調整区間の最大と最小の1/2とする.
- ⑦ 位相差は, 一周期の交点位置を P_i とし, 以下の式から求めることになる.

$$\begin{aligned}\omega t + \varphi &= \sin^{-1}(P_i/A_m) \\ \varphi &= \sin^{-1}(P_i/A_m) - \omega t\end{aligned}\quad (5)$$

解は二つになるので, 測定積分波形と比較し選択することになる.

相殺する零相電流 I_0 は, 次式になる.

$$I_0 = A_m \sin(\omega t + \varphi)\quad (6)$$

以上によりオフセットと零相電流分は除去できる. なお, オフセットには回路に起因するものではなく雷雲電荷変化による静電誘導電流が支配的であることに注意が必要である.

富士山測候所の山麓に繋がる接地線は, 高压ケーブル内蔵の接地線だけではなく複数の接地線がある. これを高压ケーブル内蔵の接地線のみでできれば零相電流は大きく抑制できるが富士山測候所建物の接地抵抗を無限にできないため, ゼロにはできない.

高压電源使用時はどうしても零相電流が生じる. これを大幅に抑制するには高压電源を使用しないことであるが, 消費電力が多い夏期研究利用期間中に電源を止めることはできない. 可能にするためには利用期間外に十分な容量のバッテリー電源により稼働することで零相電流の影響を受けない測定が可能になる. データ処理も楽になり, 精度も高まると考えてよい.

自動データ処理体制が確立できなければ, 処理できないデータが蓄積することになってしまう. 解決する別の方法として, 観測データとその処理方法を定めて公開し広く活用してもらう方法もある.

5-3 山麓での接地線電流測定の実現

山麓側からの逆流電流はまだ不明な点があるが, 将来落雷電流を山麓側でも観測できるようにすることで逆流電流のより正確な定量評価が可能になり, 新たな知見・情報が得られるようになって考えている. 73号柱の架空線から埋設ケーブルへの立ち下げ部分にログウスキーコイル電流検出器を設けることで可能になる. 基本的には測候所と同一の測定系を設ける必要がある. 測定系を動作させる電源が無いので, 風力発電や太陽光電池付きバッテリー電源で動作させる必要がある. 測定系の省電力化を計り必要な電源容量を小さく済むようにすることも必要である. またボックスに収めるなど設置場所の天候に耐えられるようにすることも必要であ

る. この観測は通年観測が可能である.

5-4 観測現象の解明

今迄の測定により得られた現象の特徴の原因解明が必要で, 以下のものがある.

- (1) 前兆現象の放電によるものと考えられる接地線検出電流パルス極性は同一であり線状放電路の進展は同じ方向になると推測される. これを裏付ける放電路帯電機構でなければならぬ.
- (2) 何故遠方駿河湾での落雷は正負に振れるのか, 説明できる発生機構が必要である.
- (3) ステップトリーダの進展に伴う静電誘導電流変化は雷雲電荷の変化を示し, 雷雲電荷の変化傾向は, 見掛け上, 測候所の誘導電荷量を小さくし正方向の電流増加を示していることになる.
- (4) 雷雲電荷は落雷により急激な変化を伴い, 測候所と山麓を繋ぐ接地線にはパルス状の静電誘導電流が流れる. 負極性雷の場合, これによる電流は山麓側(正方向)に流れることになる. その結果, 積分電荷量は正のステップ状変化になる. 山麓側の落雷により測候所に逆流してくる場合も同極性のため, いずれの現象かは電磁結合によるパルスの極性や位置により判定することになる.

6. おわりに

2013年の最初の測定から6年目になり洗練された雷現象観測装置になりつつある. まだ色々な問題点も明らかになっており, 改善を図っていくことで雷現象解析に威力を発揮できるものになると考えている.

以下に以上の今迄の成果と今後についてまとめた.

- (1) 雷現象が接地線に電流を流すメカニズムを明らかにした.
- (2) まだ問題点はあるが, 雷現象を反映した安定な高感度測定が可能になっている.
- (3) 雷現象の解析に適したデッドタイム対策方法を提案した.
- (4) 観測データは多くなるため, マニュアル処理では所要時間は膨大になるため自動データ処理を導入し, 省力化を計る必要がある.
- (5) 複数現象の測定が可能のため, 雷現象の全体像が見えるようになり, それぞれの現象を反映した測定評価が可能になっている. 測定を重ねることでより正確な雷現象の機構が明らかになるものと考えている.
- (6) 測定系の評価に必要な回路等定数の求め方について明らかにした.

雷現象により接地線に流れる電流の傾向が明らかになってきており観測の積み重ねによりメカニズムは明確になると考えている. そのためにもデッドタイムの無い測定方法, 及び人力に頼らないデータ処理方法の導入が必要である.

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、関電工の小志戸前孝史、井上毅の各氏、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
- 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) 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.
- 10) 石井勝 (2013-9). 上向き雷放電, 第 31 回レーザセンシングシンポジウム特別講演.
- 11) 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.
- 12) 北川信一郎 (2001 年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
- 13) 高橋劭 (2009 年), 雷の科学, 東京大学出版会.
- 14) 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). 富士山測候所のための落雷対策, 電気学会 A 部門, Vol.132, No.11, 984-992.

富士山を利用した高所登山のためのアクティブラーニングの試み

笹子悠歩¹⁾, 照内明良¹⁾, 井出里香²⁾, 油井直子³⁾, 山本正嘉⁴⁾

¹⁾鹿屋体育大学大学院, ²⁾東京都立大塚病院,

³⁾東京慈恵会医科大学スポーツ・ウェルネスクリニック, ⁴⁾鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

1. 緒言

海外の高山に出掛ける登山者にとって、事前の高所順応は、より安全な登山を行うために重要な要素の一つである。日本で実施できる高所順応トレーニングおよび自身の順応レベルを評価する手法の一つとして、低酸素室が挙げられる。低酸素室は、山に登らなくても目標とする標高の酸素濃度を容易に再現できるという利便性から、近年急速に普及している。

しかし低酸素室は実際の山とは異なり、低圧、低温、乾燥、日射、風といった環境条件や、登山特有の睡眠を含めた数日間に渡る低酸素暴露を再現することは難しい。またこれらの環境条件や睡眠などは、高山病の発症に影響を与える。そのため、事前の高所順応トレーニングおよびその評価は、低酸素室よりも実際の山において実施することが、最も理想的な形といえる。

日本にいながら低酸素負荷を掛けられる山として、我が国最高峰である富士山が挙げられる。富士山は日本の山の中でも群を抜いて高く、4,000m に近い標高がある。また五合目から山頂までの登山時間は、上りが約 6~7 時間、下りが約 3~4 時間と比較的長時間であることに加え、山小屋を活用すれば、睡眠を含めた数日間の低酸素トレーニングが可能である。つまり富士山は、海外の高山に出掛ける登山者の高所順応トレーニングおよびその評価の場として、有用性が高いといえる。

富士山を活用したこのような取り組みは、一部の高所登山家などの間ですでに行われてきた。しかしそれらは登山者の経験を基に実施されており、その有用性や評価手法について、運動生理学等の知見を加味して詳細に検討した研究は少ない。そのため、これらの知見を得ることができれば、高所登山家のみならず、海外での高所登山を目指す一般の登山者にとっても、高山病を予防し、より安全な登山を行う上で有益な知見になると考えられる。

そこで本研究では、高所順応トレーニングおよび順応の評価の場としての富士山の有用性について、1名の一般登山者を対象に事例的に検討することを目的とした。

2. 方法

対象者は、ヨーロッパ最高峰であるエルブルース (5,642m) の登頂を目指す中高年女性 1 名 (年齢: 58 歳, 登

山歴: 約 1 年) とした。

登山の日程は、登山前夜に富士宮口 5 合目に宿泊し、1 日目に 5 合目から山頂まで上り、山頂の気象観測所に 1 泊した後には下山をするという、前夜泊を含めた 2 泊 3 日の行程であった。

測定項目は著者らの先行研究^{1,2)}の知見に基づき、行動中(上りと下り)の心拍数、動脈血酸素飽和度、主観的運動強度、急性高山病スコア、および睡眠中の心拍数と動脈血酸素飽和度とした。また登山中には歩行速度や先行研究で報告されている登山における運動生理学やトレーニング等の知識³⁾、そして歩き方や低酸素環境下での呼吸法などについても教授しながら登山を行った。

3. 結果および考察

図 1 は、上りおよび山頂での睡眠中の動脈血酸素飽和度を、対象者と同行した検者に分けて示したものである。なお両者はどちらも富士登山の前に複数回、低酸素室にて高所順応のためのトレーニングを行っている。

上りについては、休憩時の値は検者と同程度である一方、同じ速度で歩いているにも関わらず、行動中は検者よりも低値を示し、それは山頂付近でより顕著であった。また睡眠中については、同行した検者は 80% 程度を推移している一方で、対象者の女性は常時 70% 以下であり、一時的に 60% 程度まで低下していた。

これらの結果から、①登山中の休憩時は意識的に呼吸をするため問題はないが、行動中も動脈血酸素飽和度を高くするような呼吸を意識すること、そして②高所順応のトレーニングとして運動のみをするのではなく、仮眠や宿泊など睡眠を含めたトレーニングをすること、をアドバイスした。

富士登山後、本対象者はエルブルースに出発するまでの間、本研究で得られたデータを民間の低酸素室を有するトレーニングジムのトレーナーとも共有し、その後のトレーニングに生かしたことに加え、自身でもう一度富士登山に行くなど、高所順応トレーニングを積極的に行った。

その結果、本対象者はエルブルースの登頂に成功したことに加え、全行程において高山病の症状は皆無であり、睡眠時の動脈血酸素飽和度にも顕著な低下が見られなかったとのことであった。

また対象者からは、富士登山中に低酸素環境下での呼

吸法や歩き方などを学べたことは、実際に海外の山に登る際にも活用ができる有用な知見であったこと、そして事前に富士登山をしたことにより、高所登山に対する自信にも繋がったなどの内省報告が得られた。

4. 結論

本研究は対象者 1 名の事例的な検討であるが、本研究結果から、①富士山は高所順応トレーニングの場としてはもちろん、その評価の場としても有用性が高いこと、そして、②これらの評価から対象者の高所における弱点を見出し、それを低酸素室で補強するといった富士山と低酸素室の相互活用は、より安全に高所登山を実施するための有用なトレーニング方法である可能性、さらに③対象者自身が富

士登山の結果を踏まえ、自主的にその後のトレーニングに取り組むといったアクティブラーニングを促す場としても活用可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 笹子悠歩, 山本正嘉: 富士登山時の生理的・物理的な負担度; 登山経験の豊富な中高年者を対象として. 登山医学 30, 105-113, 2010.
- 2) 笹子悠歩, 山本正嘉: 登山経験の少ない高齢者における富士登山時の生理応答; 運動時, 安静時, 睡眠時を対象として. 登山医学 31, 132-144, 2011.
- 3) 山本正嘉: 登山の運動生理学とトレーニング学. 東京新聞, 東京, 2016.

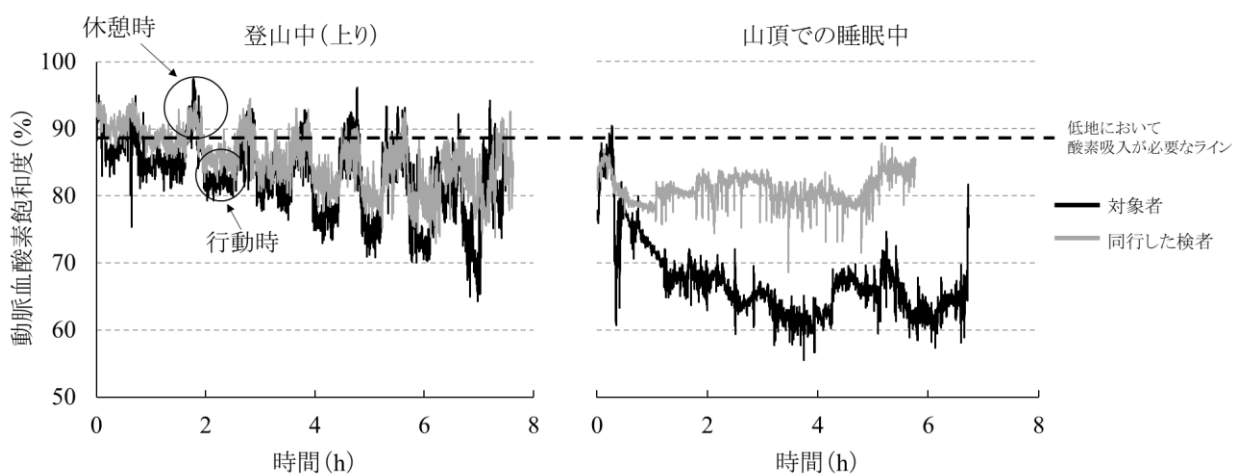


図1 登山中(上り)および山頂での睡眠中の動脈血酸素飽和度

富士登山における体幹 2 点歩行動揺計による動的歩行バランスの評価

井出里香¹, 油井直子², 笹子悠歩³, 照内明良³, 山本正嘉⁴,

1. 東京都立大塚病院 耳鼻咽喉科, 2. 東京慈恵会医科大学スポーツ・ウェルネスクリニック,
3. 鹿屋体育大学大学院 4. 鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

1. 緒言

標高 2500m 以上は高所と定義され、急性高山病 (Acute Mountain Sickness: 以下 AMS) が発症するといわれている。標高 3500m 以上は高高所と定義されており、AMS の発症率も高くなる。富士山は標高 3776m で国内唯一の高高所であるが、世界文化遺産に登録されてから海外からの登山者も増加している。富士山では 5 合目から AMS を発症する可能性があり、富士山での遭難の半数は AMS が占めている。2018 年の警察庁統計では山岳遭難者数は 3129 人で過去最高となり、40 歳以上が 78.5% (2457 人) を占めている。要因として道迷い 37.9%、滑落 17.4%、転倒 15.0% などがあげられる。一方、高所順応の第一関門となる高度 4000m に近い標高を有する富士山は AMS とそれに関連した病態の解明、高所順応の評価と効率的なトレーニング法の開発、登山による身体的影響を研究するには適した環境でもある¹⁾。海外登山前に低酸素室を利用するケースも増えているが、実際の登山に近い富士山の高所順応トレーニングを組み合わせることにより、現地での効率的な高所順応が可能になり、登山期間の短縮や安全な登山にもつながる。世界文化遺産である富士山に安全に登山して頂くためのサポートや安全な登山の普及に向けて富士山での研究成果をフィードバックできれば幸いである。前回の研究では立位時の静的バランス機能において高度(低圧低酸素)による変化は認められなかったが、今回の研究では体幹 2 点歩行動揺計を用いて富士登山における歩行時の動的バランス機能の評価し、AMS との関連性について検討をおこなった。

2. 対象・方法

ヘルシンキ宣言に従い、本研究に同意を得た 31~58 歳の健常者 4 名 (男性 2 名、女性 2 名) を対象とした。富士宮ルートより富士登山を行い、富士山 5 合目登り (2400m) → 富士山頂 (3776m) 到着時 → 富士山頂 (3776m) 翌日 → 富士山 5 合目下り (2400m) → 新富士駅 (7m) において体幹 2 点歩行動揺計 (図 1) を用いて歩行時の動的バランス機能の評価した。レイクルーズスコア (Lake Louise Score: 以下 LLS) を用いて AMS の診断、重症度を判定した (図 2)。同時にパルスオキシメーター (SAT-2000) を用いて SpO₂ (経皮的動脈血酸素飽和度) %/pulse (脈拍数) bpm を測定した。

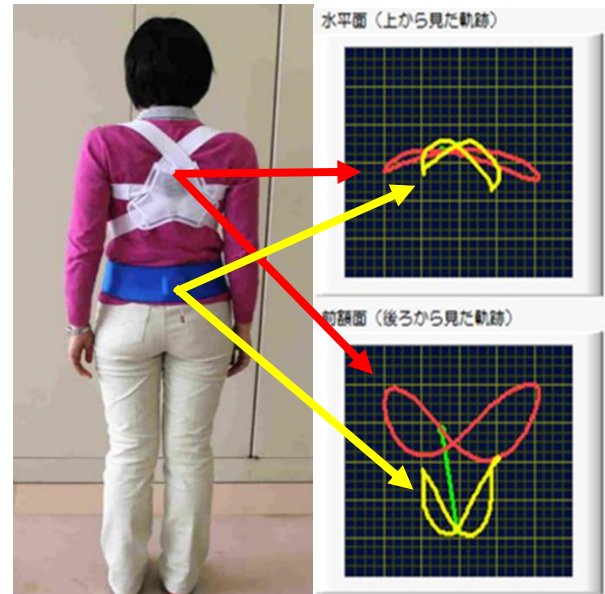


図1. 体幹 2 点歩行動揺計

(MVP-WS2-S: マイクロストーン社)

上半身(脊椎)と下半身(仙骨)に加速度・角速度センサーを装着して、歩行時の円滑度、水平度、左右対称性を評価する。

Lake Louise Score (LLS) for the diagnosis of Acute Mountain Sickness (AMS)

A diagnosis of AMS is based on:
1. A rise in altitude within the last 4 days
2. Presence of a headache
PLUS
3. Presence of at least one other symptom
4. A total score of 3 or more from the questions below

SELF-REPORT QUESTIONNAIRE

Add together the individual scores for each symptom to get the total score.

Headache	No headache	0
	Mild headache	1
	Moderate headache	2
	Severe headache, incapacitating	3
Gastrointestinal symptoms	None	0
	Poor appetite or nausea	1
	Moderate nausea &/or vomiting	2
	Severe nausea &/or vomiting	3
Fatigue &/or weakness	Not tired or weak	0
	Mild fatigue/ weakness	1
	Moderate fatigue/ weakness	2
	Severe fatigue/ weakness	3
Dizziness/lightheadedness	Not dizzy	0
	Mild dizziness	1
	Moderate dizziness	2
	Severe dizziness, incapacitating	3
Difficulty sleeping	Slept as well as usual	0
	Did not sleep as well as usual	1
	Woke many times, poor sleep	2
	Could not sleep at all	3
TOTAL SCORE:		

Total score of:
• 3 to 5 = mild AMS
• 6 or more = severe AMS

Note:
• Do not ascend with symptoms of AMS
• Descend if symptoms are not improving or getting worse
• Descend if symptoms of HACE or HAPE develop

図2. レイクルーズスコア (Lake Louise Score: LLS)

3. 結果・考察

体幹2点歩行動揺計による動的歩行バランスとAMSとの関連性について、下記項目につき検討を行った。

1) 富士山5合目→富士山頂到着時の変化

登りでは4例とも富士山頂到着時の円滑度は増大し、動きはスムーズであった。山頂到着時に疲労・脱力があつた症例も円滑度の低下は認めなかった。

2) 富士山頂→富士山5合目の変化

下りでは4例とも富士山5合目で円滑度は減少して、動的歩行バランスが低下していた。これは下肢筋疲労の影響より重力による身体の落下に対して着地時の膝の制動により円滑度が低下したと考えられる。

3) 富士山頂における到着時と翌日の比較

富士山頂翌日は4例中3例で円滑度の低下を認めたが、AMSの頭痛との関連性は認めなかった。また富士山頂(庁舎)の階段では上りで4例中3例が円滑度の低下を認め、下りでは4例とも円滑度が著名に低下していた。特に前後動揺比が大きく、前のめりに歩行バランスを崩しやすい傾向が見られた。これは滑落や転倒の要因にもつながると推察された。翌日には3例で円滑度が低下して、前後の動揺比が増大していた。

4) 登山前と登山後の比較

円滑度は4例とも下山後に増悪しており、下肢筋疲労などの影響が考えられた。1例は水平度、左右対称性も増悪しており、両者には関連性があると考えられた。

体幹2点歩行動揺計の円滑度は全例において下りで著明に低下が認められ、滑落、転倒の危険因子になりうると推察される。また今回の測定で歩行パターンに2通りあることが示された。1つは下りで上下の動揺は増大しているが、円滑度の低下が小さいもので、膝を曲げて着地して円滑度の低下を最小限にしている歩行パターンである。もう1つは下りで上下の動揺は変わらないが、円滑度が大きく低下するもので、下りで膝を曲げずに着地をするため、円滑度が低下するパターンである(図3)。円滑度が低いと滑って転倒する傾向があるため、後者は下りで転倒するリスクが大きくなると推測される。

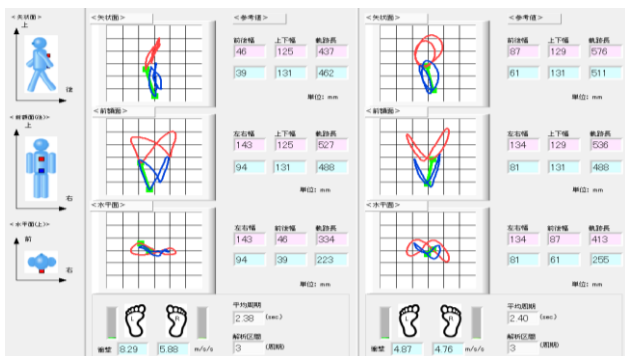


図3. 円滑度が低下して、転倒リスクが大きくなる歩行パターン

LLSとSpO2/pulse

- LLSでは山頂到着後に疲労・脱力2.5が1例、山頂滞在翌日に頭痛1(軽度)が2例に認められたが、いずれもAMSの診断には至らなかった。
- SpO₂は4例とも5合目(起床時)93-95%であったが、山頂到着時3例は80-85%,1例のみ77%であった。
- 山頂到着時にLLSの疲労・脱力2.5の症例はSpO₂77%と低下していた。翌朝は疲労・脱力は軽快するも、SpO₂77%と不変であった。
- 山頂滞在翌朝にLLSの頭痛1が2例あり、うち1例はSpO₂67%と著明に低下していた。
- pulseは4例とも山頂到着時は110-120bpmであったが、翌朝には100bpm以下になっていたが、SpO₂の改善はほとんど認められなかった。

4. 結論

本研究では動的歩行バランスにおいても明らかな高所(低圧低酸素)の影響は認められなかったが、登山の下りでは全例とも円滑度が著明に低下していた。特に前後の動揺が増大して前のめりに歩行バランスを崩しやすい傾向が見られた。体幹2点歩行動揺計により円滑度の低下も滑落、転倒の危険因子になりうると推察された。

5. おわりに

体平衡の制御メカニズムは迷路前庭系など入力レベル、中枢前庭系における統合・制御レベル、四肢・躯幹の骨格筋など出力レベルで各要素が関与している。さらに標高5000m以上では低酸素血症による大脳皮質の前庭中枢への影響も加わる。動的歩行バランスは各レベルの要因が複合しているため、総合的に評価する方が望ましい。体幹2点歩行動揺計は最終出力レベルとして評価でき、歩行パターンも個別にみることで、転倒を防止して疲れにくい歩行を身に着けるためのツールとしても有用であると思われる。

参考文献

- 1) 井出里香(2016). 富士山測候所を活用した登山医学分野の研究-富士山頂で睡眠時無呼吸症候群はどうなるのか? 富士山頂でのふらつきの要因は? ヤマケイ登山総合研究所編, 211-216. 登山白書2016. 山と溪谷社.

宇宙線ミュオンによる富士山透視の試み

○居島薫¹, 永嶺謙忠^{1,2}, 藤牧拓郎¹, 鳥養映子¹, 鈴木秀典¹, 鈴木美季¹, 小林拓¹, 白木一郎¹, 堀裕和¹, 後藤聡¹

1 山梨大学, 2 高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

富士山太郎坊に観測用コンテナを設置し宇宙線ミュオグラフィを開始してから約1年半が経過した。昨年度の成果報告会では、検出器の方向や観測範囲(倍率)などを調整し、バックグラウンドノイズ低減のために鉄散乱体を挿入したことを報告した。今年度はさらなるバックグラウンドノイズ低減対策を実施した。

山体の内部探索を宇宙線ミュオンの透過強度減衰法で観測する試みに於いて、山体透過距離が1kmを越える測定が正しく出来た例は無い。富士山の山頂から標高が500m下るだけで直径が2kmを超える。極わずかに透過して飛来するミュオンを統計処理するため、単に長時間を要するだけでなく、バックグラウンドノイズの量が真のミュオンの量を上回ることが判明した。これを除去することにより、富士山体内部構造に起因するミュオン透過強度の極わずかな差を検出することが出来る。以下の対策を実施した。

2. 高エネルギー電子線などの除去(1月, 7月)

観測装置内のミュオン経路内に鉄板(合計厚さ10cm x2相当, 重量1.3t)を設置した(図1)。主なバックグラウンドの正体は、高エネルギー電子線・ガンマ線などであることが知られている。図2に電子線除去の概略図を示す。設置した鉄板をミュオンはそのまま透過するが、ミュオン以外の高エネルギー粒子は、前方に多荷電粒子線のシャワーを発生する確率が高い。測定回路のロジックは、多点同時検出を区別するように設計されているため、ミュオン以外のシグナルを除外できる。図3に鉄散乱体を設置したことによる効果を示す。楕円で示された部分では、山体の厚さが2kmを超えており、本来は宇宙線ミュオンが透過する確率が僅少の領域であるため、黒くなるはずである。図1(b)よりバックグラウンドノイズが軽減できたことが確認できるが、さらにバックグラウンドノイズを軽減す

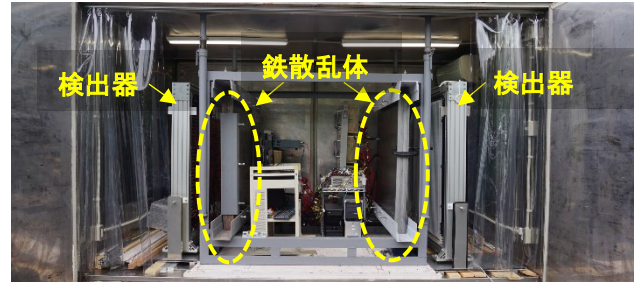


図1 鉄散乱体を設置した観測コンテナの内部

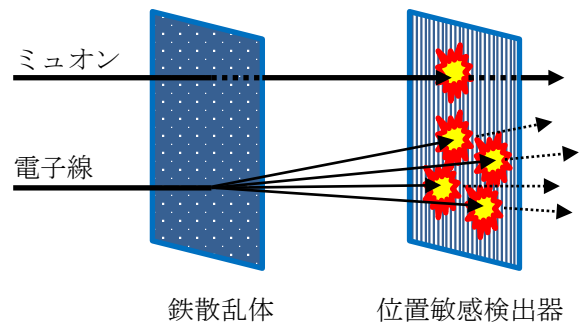
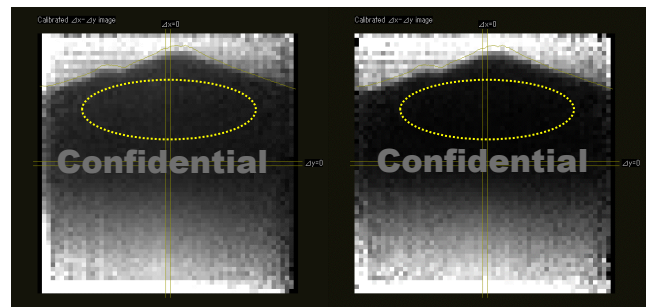
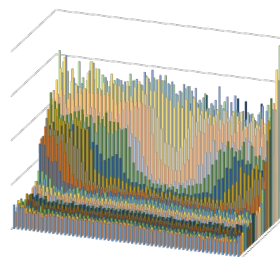


図2 電子線除去の概略図

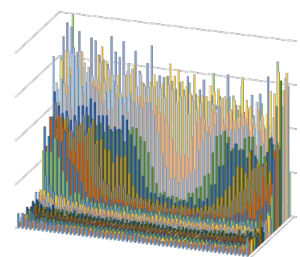


(a) 鉄散乱体なし

(b) 鉄散乱体×2体



(c) 透過強度
鉄散乱体なし



(d) 透過強度
鉄散乱体×2体

図3 鉄散乱体によるバックグラウンドノイズ除去効果：測定器でのミュオン強度(z軸)の水平方向(x軸)の依存性を富士山方向の高さで色分けして示す。

ることにより、山肌などの薄い部分の鮮明化が期待できる。

3. ミュオンなどの飛来方向の検出

図4に示すように、上方に散乱したミュオンが存在するとバックグラウンドノイズを形成する。これまでは、常識的にミュオンは必ず下方を向いて飛来するとしていたが、山体や空気を透過したミュオンが上方に散乱したものを、空からきたミュオンと取り違える事である(図5)。山肌に張り付くような対象物に近接した位置で観測する富士山固有の問題点で、これまでに報告例がない。ホドスコープを構成する2枚の位置敏感カウンター間を通過する際の、信号の時間差より、これらの問題を処理出来るはずである。

ミュオン検出器からの信号は、計測回路(FPGA)でタイミング処理している。2面の位置敏感検出器がある時間幅 Δt 以内に信号を発生する場合を計数(同時計数)する。2面の位置敏感検出器の間隔は2.4mに設定しているため、ほぼ光速で飛来するミュオンを検出すると、面間で8ns程度時間差を生ずる。これを時間分解することで飛来方向を特定できる。10月から1月にかけてFPGAの改良と、劣化した検出器の改修を実施して、現在は新しい実験体系で観測しながら信号強度の調整作業をしている。

5. まとめと今後の展望

2019年度はバックグラウンドノイズの軽減対策に終始した。前半に実施した鉄散乱体の設置により透視画像の鮮明化に成功した。10月から1月にかけて実施したFPGAの改良により、バックグラウンドノイズを形成する粒子線の起源を特定出来、ノイズを狙い撃ちして除去できると考えられる。この結果は、統計データの蓄積とともに数カ月で得られる予定である。山体内部の密度長の違いの可視化を目指したい。

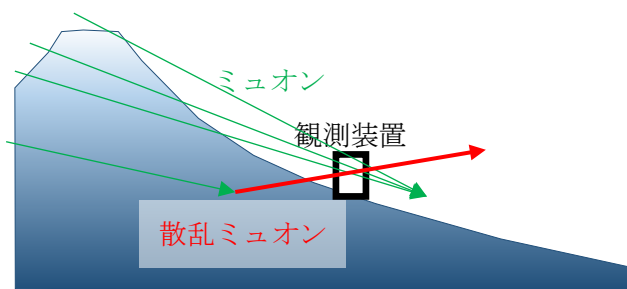


図4 富士山透過ミュオンの中で散乱ミュオンによるバックグラウンドノイズ

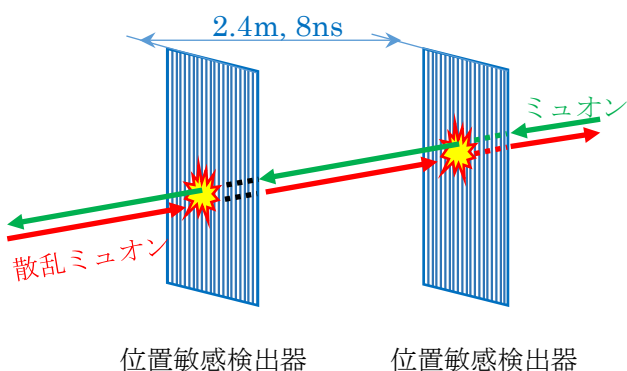


図5 2面の位置敏感検出器による方向決定

謝辞

観測装置の設置場所を提供していただいている NPO 法人富士山測候所を活用する会、ならびにイグラ様、装置重量物の搬入にあたり、有益なご助言とご助力を頂きました三浦和彦先生、大河内宏先生、事務局の皆様に、感謝申し上げます。

富士山頂における PM₁ 中無機元素の昼夜別変動

○米持真一¹, 堀井勇一¹, 畠山史郎², 崎山浩太³, 大河内博³, Ki-Ho Lee⁴

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

1. はじめに

我が国の PM_{2.5} 濃度は緩やかに低下傾向が見られており, 特に関東地方では高濃度現象も減少している. 中国国内の PM_{2.5} 濃度にも改善が見られているが, 大陸から自由対流圏を輸送される人為起源粒子の評価手法を検討することは重要と考えられる.

大気エアロゾルは, 粒径 2 μm 前後を境に粗大粒子と微小粒子とに大別され, PM_{2.5} には粗大粒子の一部が含まれる (図 1). PM₁ を調べれば, 人為起源粒子に特化した評価が可能と考え, 2005 年から, 埼玉県環境科学国際センター (埼玉県加須) にて PM₁ と PM_{2.5} の通年測定を継続している. 富士山頂では 2018 年に PM₁ の 24 時間採取を行い, 人為起源粒子の濃縮係数が PM_{2.5} よりも大きいことが分かった¹⁾. また,

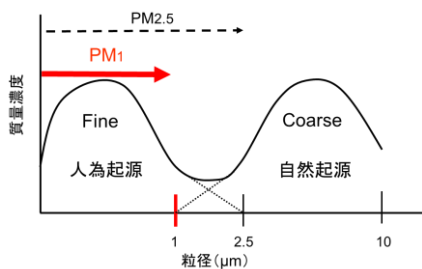


図 1 大気粒子の粒径分布と PM₁

2017 年に実施した PM_{2.5} の昼夜別採取で, 夜間の試料でよりクリアに長距離輸送された粒子が確認できたことから 2019 年は PM₁ の昼夜別採取を試みた.

2. 調査方法

旧富士山測候所 1 号庁舎に設置した PM_{2.5} サンプラー (2025i) の分級器を PM₁ Sharp cut cyclone (SCC) に換えて PM₁ を採取した. 期間は 2018 年 7 月 25 日～8 月 16 日の 23 日間とし, PTFE フィルター (Teflo, Pall) を用いて, 6 時と 18 時にフィルター交換を行った. 6 時～18 時を日中, 18 時～翌朝 6 時を夜間とした. フィルターの 1/2 を水溶性無機イオン (IC 法), 残りを無機元素 (マイクロウェーブ酸分解 - ICP/MS 法) の分析に使用した. また, 埼玉県加須では, PM714 を用いて PM₁ の 1 時間濃度を測定しており, この測定値も活用した.

3. 結果と考察

図 2 に富士山頂の PM₁ 濃度の変化を示した. また, 参考に埼玉県加須の PM₁ と PM_{2.5} 濃度の昼夜別 12 時間平均値の推移を示した. PM₁ 濃度は $2.7 \pm 2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり, 日中 $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 夜間 $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で, 日中の方が濃度は高くなっていた. なお 2017 年に行った PM_{2.5} の昼夜別採取では, 日中と夜間には大きな差は見られなかった. なお, 加須では 7 月

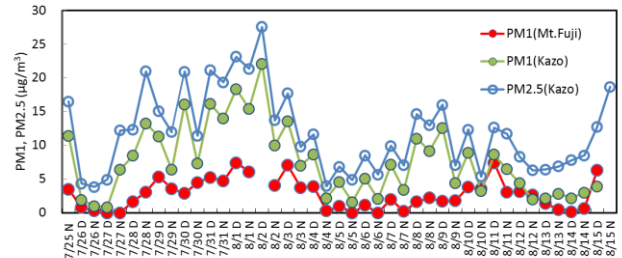


図 2 富士山頂と埼玉県加須の昼夜別 PM₁ 濃度

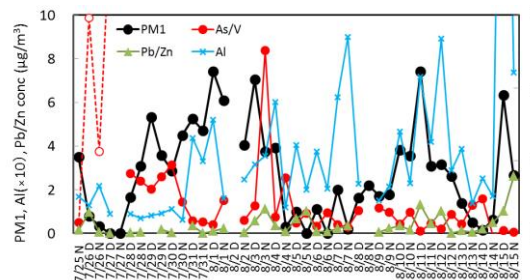


図 3 富士山頂の PM₁ 中 Al 濃度及び元素比

28 日から 8 月 2 日にかけて日中の PM_{2.5} 濃度が $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える日が続いた. これまで, Al を富士山表土, As/V を長距離輸送の指標として用いてきたことから, これらの変化を図 3 に示した.

Al は PM_{2.5} と同様に日中に上昇し夜間に低下する日内変動が見られ, PM_{2.5} のうち PM_{2.5-1} に分布すると考えられる自然起源粒子の影響は PM₁ でも現れている可能性がある. As/V は 7 月 28 日～30 日にやや上昇し 0.61～0.94 で推移, 8 月 3 日夜間は 2.5 で明瞭な増加が見られた. 7 月下旬は 7 月 27 日に日本列島に上陸した台風 6 号の影響が考えられる. 一方, 8 月 3 日夜間は後方流跡線で大陸方面から気塊の輸送が示唆された. なお, これ以外の期間は As/V の上昇は見られなかった.

4. おわりに

2015 年～2017 年は PM_{2.5}, 2018 年からは PM₁ の採取を行い, 無機元素に着目した分析, 解析を試みてきた. 中国では PM_{2.5} 対策が進んでいるが, 富士山頂の微小粒子に含まれる石炭燃焼に由来する元素に着目することで, 対策効果の評価が可能と考えられる. なお, 本観測は埼玉県大気環境課 PM_{2.5} 対策事業費により実施された.

参考文献

1) 米持ほか(2019). 富士山頂で連続採取した PM₁ による人為起源粒子の評価, 第 12 回成果報告会講演予稿集, 11.

富士山体を利用したスカイラジオメータによるエアロゾルの鉛直分布観測

桃井裕広¹, 新沼拓², 青木一真³, 森樹大², 鴨川仁⁴, 大河内博⁵, 入江仁士¹, 三浦和彦², 中島映至⁶
1.千葉大学, 2.東京理科大学, 3.富山大学, 4.静岡県立大学, 5.早稲田大学, 6.宇宙開発研究機構

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多様であること、時間および空間依存性が大きいことなどに起因している (IPCC 2013, 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多地点での観測が必要であり、富士山麓でもスカイラジオメータを用いた観測が行われた¹⁻⁵⁾。富士山は山頂が自由対流圏に位置しており、山麓と山頂 (夏季のみ) の両地点でその場観測が行われている。本研究では、従来の両地点におけるその場観測に加えて、夏季に富士山頂および山麓でリモートセンシング装置による同時観測を実施した。

2. 観測

静岡県御殿場市に位置する富士山麓太郎坊 (35.33N, 138.80E, 1290 m a.s.l.) においてスカイラジオメータ (POM-02, Prede Co., Ltd.) による放射観測を 2014 年 7 月から 2019 年 8 月に行った。富士山麓は御殿場の市街地から離れており局地的な汚染を受けにくい。また、富士山麓ではスカイラジオメータによる放射観測に加えて、光散乱式粒子計数器 (OPC, KC01E, RION Co., Ltd.) によりその場のエアロゾル粒径分布を測定した。エアロゾルの吸湿成長による粒径分布のシフトを避けるために拡散ドライヤーを用いて相対湿度を 35% 以下に保持した。また、2019 年は夏季 (7 月 25 日から 8 月 22 日) に限り富士山頂 (35.21N, 138.43E, 3776 m a.s.l.) でも OPC とスカイラジオメータによる観測を実施した。

スカイラジオメータの観測は、340, 380, 400, 500, 675, 870, 1020 nm の波長について太陽直達光照射度 (DSI, F) および天空輝度 (DR, L) 分布を測定している。地球に散乱体がない場合の直達光照射度 (CC, F_0) を決定し、エアロゾル以外の空気分子による Rayleigh 散乱、オゾンなどの吸収体による光吸収 (τ_{Rayleigh} , τ_{Ozone}) を差し引くことで、DSI からエアロゾルの光学的厚さ (AOT, τ);

$$\tau = \ln(F/F_0) / m_0 - \tau_{\text{Rayleigh}} - \tau_{\text{Ozone}} \quad (1)$$

を求めた。また、AOT の波長依存性;

$$\ln(\tau) = -\alpha \times \ln(\lambda) + \beta \quad (2)$$

からオングストローム指数 (AE, α) を算出した。AE は 1 を指標にして値が大きいほど微小粒子が卓越し、小さいほど粗大粒子が卓越することを表している。

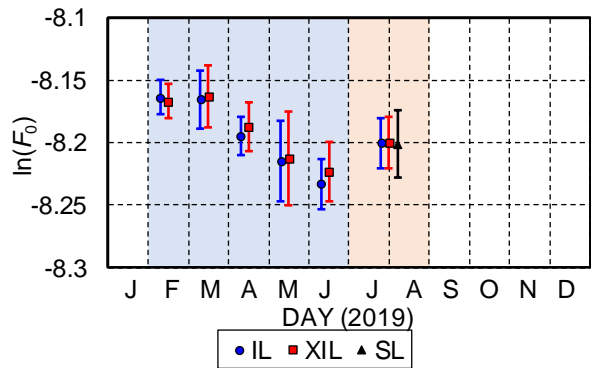


図 1 : PS2501401 の 500 nm の F_0 の季節変化。
2 月～6 月 : 東京神楽坂, 7 月～8 月 : 富士山頂。

一方、DR を用いて逆問題を解くことで、エアロゾルの複素屈折率 (CR) とエアロゾルの粒径分布 (VSD) を決定した。本研究では DSI の解析には DSRAD⁶⁾ を、DR を用いた逆問題の解析には SKYRAD.pack シリーズ⁷⁾ を用いた。

3. 結果・考察

本研究は富士山麓・山頂におけるリモートセンシング観測を実施することで富士山体のエアロゾルの鉛直分布を観測することを試みた。そのため、はじめに富士山頂での装置のキャリブレーションを実施して CC を決定した (3. 1 節)。次に、富士山頂における DSI による解析、DR を用いた逆問題の解析を実施した (3. 2 節)。最後に富士山麓および富士山頂における鉛直分布観測を解析した (3. 3 節)。

3. 1. 富士山頂における F_0 の決定

通常、太陽を光源とした分光放射計は式 1 を用いて、AOT が小さく、一定であるような状況下でキャリブレーションが行われる (標準ラングレー法, SL 法)。スカイラジオメータは DSI・DR 比 (NR, R);

$$R = L/F/m \quad (3)$$

を用いることでセンサー感度に依存せず、大気物理量のみで決まる値に規格化することができる⁷⁾。また、太陽近傍の NR は VSD の情報が支配的であるため、VSD について逆問題の解析をすることでエアロゾルの光学特性が変化するような大気下でも装置のキャリブレーションを行うことができる改良ラングレー法 (IL 法) やクロス改良ラングレー法 (XIL 法) が開発されている^{7,8)}。

図 1 は SL 法, IL 法および XIL 法を用いて月ごとに決定

した 500 nm の CC の値を示す。IL 法および XIL 法によって CC を計算するにあたり、VSD の推定には SKYRAD.pack Version 4.2 (V42) ⁷⁾ を用いた。富士山頂では 7 月と 8 月のデータを用いて検定した。富士山頂で使用した装置 (S/N PS2501401) は 2019 年 2 月から 6 月まで東京神楽坂 (35.70N, 139.74E) で大気観測を行っていた。東京神楽坂における CC の季節変動は受光部の温度特性などによるものであると考えられる。また、IL 法によって決まる CC は XIL 法によって決まる CC よりも値が小さくなった。これは IL 法における統計的な手法の誤りによるものであると考えられる ⁸⁾。2019 年 6 月の CC と 7, 8 月の CC は顕著に異なっており、2019 年 6 月の CC の方が小さい。これは、装置の運搬による光学系の変化や、設置環境 (周辺気温や気圧) の違いが原因として考えられる。そのため、スカイラジオメータを用いた観測は装置のその場校正が必要であることを示唆しており、自己校正手法の重要性を裏付けるものである。富士山頂では、大気が安定していた日に DSI を用いて SL 法による検定を実施した。それぞれの手法で決定した CC は SL 法では $\ln(F_0) = -8.201 \pm 0.027$, IL 法では $\ln(F_0) = -8.200 \pm 0.020$, XIL 法では $\ln(F_0) = -8.200 \pm 0.021$ であり、どの手法においても近い値が得られた。これにより、自己校正法である IL 法と XIL 法の精度が高いことが富士山頂においても確認された。

3. 2. 富士山頂の光学特性の観測

3. 1 節で XIL 法によって決定した CC を用いて DSI から 500 nm における AOT を算出した ¹⁰⁾。次に、NR から富士山頂における CR と VSD の解析を試みた。SKYRAD.pack シリーズは放射伝達モデルに平行平板大気モデルを用いているため、 $m_0 < 3$ のデータを用いた。V42 による逆問題の解析を行い、NR と DSI の再現度を表す平均平方二乗誤差率 (RMSPE) を用いて解析精度を評価した (図 2)。太陽近傍の NR のみを用いた VSD のみの逆問題の解析 (L0 解析) では、RMSPE は 0.056 ± 0.028 であったが、全散乱角の NR と DSI を用いた CR と VSD の逆問題の解析 (L1 解析)

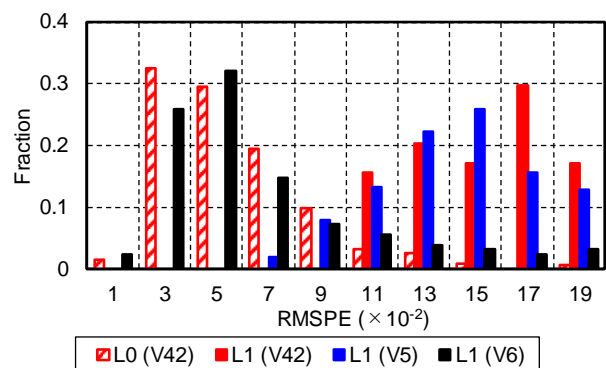


図 2: 富士山頂の観測データについて SKYRAD.pack で解析したときの RMSPE.

では、RMSPE が 0.152 ± 0.027 と NR の再現度が悪くなった。また、SKYRAD.pack Version 5 (V5) ⁹⁾ でも L1 解析では RMSPE は 0.142 ± 0.030 であった。これは、V42 と V5 の L1 解析は CC と DSI から得られる AOT について最適化を行い、AOT が低い大気において誤差の扱いが不十分であったことが原因であると考えた。そこで、CC の決定誤差を考慮した逆問題の解析手法 SKYRAD.pack Version 6 beta 版 (V6) を開発して解析したところ、L1 解析において RMSPE は 0.066 ± 0.042 と大幅に改善した。

3. 3. 富士山頂を用いた鉛直分布観測

富士山麓および山頂における同時観測を実施した (新沼ら ¹⁰⁾ 参照)。

4. まとめ

本研究では高高度に存在するエアロゾルの光学特性への理解を深めるために、富士山頂においてスカイラジオメータによる観測に挑戦した。まず、装置のその場校正を実施して標準的な方法 (SL 法) とスカイラジオメータ独自の方法 (IL 法, XIL 法) とを比較することで IL, XIL 法の有用性を確認した。次に、富士山頂でのエアロゾルの光学特性を解析し、従来の解析手法 (V42, V5) では富士山頂の大気状態を再現できないことがわかった。また、観測誤差の扱いを変更した V6 では再現率が向上し、エアロゾルの少ない富士山頂でのエアロゾルの光学特性の解析を可能にした。今後 V6 を用いて富士山頂におけるエアロゾルの光学特性を調べる。

謝辞

本研究の一部は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれた。また、本研究の一部は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」の学生公募 (S02, 2019 年度) の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 中原ら (2014). 第 7 回成果報告会講演予稿集, 36-37.
- 2) 中原ら (2015). 第 8 回成果報告会講演予稿集, 35-36.
- 3) 橋口ら (2016). 第 9 回成果報告会講演予稿集, 50-51.
- 4) 桃井ら (2017). 第 10 回成果報告会講演予稿集, 51-52.
- 5) 桃井ら (2018). 第 11 回成果報告会講演予稿集, 50-51.
- 6) Momoi *et al.* (2019). *AMTD*, in review.
- 7) Nakajima *et al.* (1996). *Appl. Opt.*, **35**, 2672-2686.
- 8) Nakajima *et al.* (2020). *AMTD*, to be submitted.
- 9) Hashimoto *et al.* (2012). *AMT*, **5**, 2723-2737.
- 10) 新沼ら (2020). 第 13 回成果報告会講演予稿集.

富士山頂における日中と夜間に発生する新粒子生成イベントの長期観測

五十嵐博己¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 矢吹正教², 岩本洋子³, 和田龍一⁴,
加藤俊吾⁵, 大河内博⁶, 鴨川仁⁷, 永野勝裕⁸

1.理科大理, 2.京都大, 3.広島大, 4.帝京科学大, 5.首都大, 6.早稲田大, 7.静岡県立大, 8.理科大理工

1. はじめに

大気中では、前駆ガスが化学反応することにより核生成を起こし、それに引き続き凝結成長することで微小粒子(粒径:数十 nm 以下)が生成される。その過程を新粒子生成(New Particle Formation; NPF)という。大気中の核生成が始まる粒径は1.5 nm(±0.4 nm)と推定¹されており、25 nmまでの範囲に主に影響を与える。そのため、太陽光を強く散乱し、気候に影響を及ぼす(直接効果)。さらに、生成された粒子の一部が雲凝結核としての能力を持ち、雲粒の大きさや雲粒数を変化させ、雲の放射特性をも変化させる(間接効果)。以上のことから、NPFは地球の放射収支を推算する上で、重要なプロセスである。

これまでの先行研究では、NPFは日中で多く観測され、NPFの生成メカニズムは光化学反応によるものが多いと考えられてきた。しかし実際には、夜間にも発生している例も報告されている²。そこで、観測例が少ない夜間イベントのメカニズムを明らかにすることは重要である。

日中・夜間共に蒸気圧の低い硫酸(H₂SO₄)がNPFの一般的な核種であると考えられている³。しかし、日中は光化学反応によりOHラジカルが生成されるが、夜間は日射がないため、揮発性有機化合物(VOCs)のオゾン(O₃)酸化反応などで二次的に生成されるOHラジカル⁴などが粒子化に影響を与えることも報告されている。しかし、このように新粒子生成や成長のメカニズムはローカルな影響が強く、複雑で十分に理解されていないのが現状である。

富士山頂では、世界でも数少ない自由対流圏の大気を定点観測出来る他、東アジア域からの前駆ガスとなりうる越境大気を観測出来ることや谷風による大気境界層の空気塊による影響を捉えることも出来るといった利点をもつ。

そこで本研究ではこの利点を活かし、2006年から2019年にわたる長期的な観測を行った。その結果から、自由対流圏内におけるエアロゾル数濃度の変化やNPFの経年及び日変化を調べると共に、日中と夜間に発生するNPFイベントの発生要因について、統計的な解析を基に考察を行った。

2. 方法

2006年から2019年までの夏季(7~8月, 2007年のみ7~9月)に、富士山特別地域気象観測所(35.360°N, 138.727°E, 3776 m a.s.l.)においてエアロゾル個数粒径分布測定装置(①DMA3085+CPC3022, ②SMPS 3034, ③DMA3081+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①4.70~148.6 nm, ②10.4~469.8 nm, ③14.9~626.4 nm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による影響を定量的に調べるため、粒径25 nm以下(核生成モード)の粒子数濃度が1時間以上増加し成長を伴う現象をNPFイベント(以下、イベント)と定義した(図1)。

また、NPFにより発生した粒子の成長のしやすさを調べるために成長速度(Growth Rate; GR)を算出した。GRはイベント時の10~25 nm内にあるモード径に対し回帰直線を引くことで算出し、決定係数が0.6以上のものを有効な値として用いた。富士山頂に到達した気塊の由来を調べるために、NOAA HYSPLIT 4 model (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)を用いて、後方流跡線解析を行った。

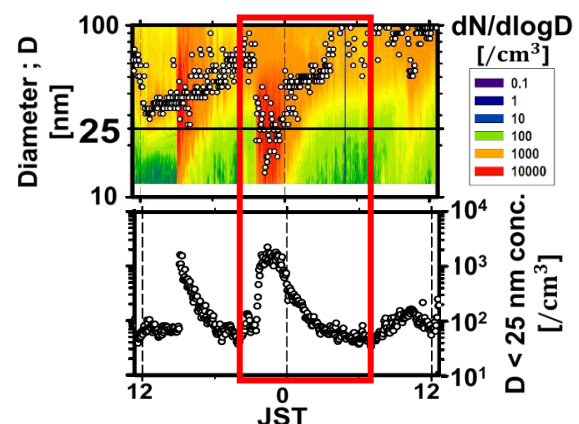


図1 個数粒径分布とNPFイベント(四角で囲った範囲) 上図○はモード径(同時刻における最大数濃度の粒径)を示す。

3. 結果と考察

2006年から2019年までのエアロゾル数濃度変化を図2に示す。ここでは、装置による器差および流量補正を行った同粒径範囲(14.9~148.6 nm)での数濃度を示す。図2の結果より、2006年から2019年まで富士山頂で観測されるエアロゾル数濃度が年々減少していることが分かった。2006年から2019年で27.9%減少した。これは、国内の二酸化硫黄(SO₂)やVOCsなどの大気ガス及び浮遊粒子状物質(SPM)や微小粒子状物質(PM_{2.5})といった粒子まで環境基準による排出規制が行われてきたことが要因の一つに考えられる⁵⁾。また、富士山頂では東アジア域からの越境大気が観測されることもあり、特にエアロゾルの排出量の多い中国においてもSO₂やPM_{2.5}などの排出量が減ってきていることも影響しているのではないかと考えられる^{6,7)}。

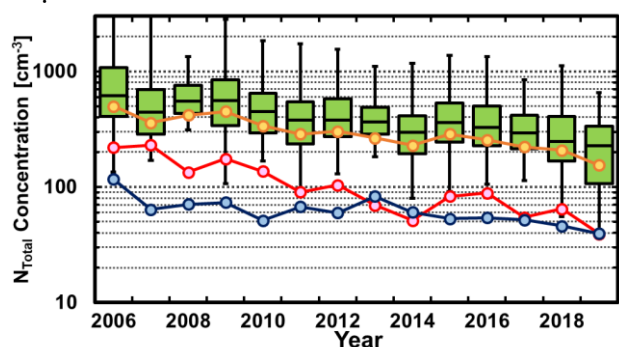


図2 2006~2019年の総粒子数濃度の経年変化(箱ひげ)及びモード(核生成, エイトケン, 蓄積)平均値の経年変化。粒径範囲は総粒子(14.9~148.6 nm), 核生成モード(14.9~24.6 nm), エイトケンモード(26.4~96.5 nm), 蓄積モード(103.7~148.6 nm)とした。

また、富士山頂の粒子数濃度分布には3つのモードが確認できる。粒径25 nm以下の核生成モード、25~100 nmのエイトケンモード、100 nm以上の蓄積モードの三つである⁸⁾。この三つのモードの中で核生成モードの減少率が最も大きく、2006年から2019年にかけて17.8%の粒子数濃度が減少した(図2)。このモードは、NPFによる影響が大きいため、NPFの発生頻度の減少または、NPFにより生成される粒子数濃度の減少による影響を受けた可能性がある。そこで、各観測年におけるNPFイベントの発生頻度及び特徴に関して考察を行った。

表1 2006~2019年におけるイベント観測頻度

日中:5~19時, 夜間:19~翌5時

赤字は各観測年における高い割合のイベントを示す。

Year	Sample days	Total events		Daytime events		Nighttime events	
		Times	Fraction [%]	Times	Fraction [%]	Times	Fraction [%]
2006	45	11	72.7	8	27.3	3	75.0
2007	39	20	25.0	5	75.0	15	75.0
2008	38	12	25.0	3	75.0	9	75.0
2009	40	28	28.6	8	71.4	20	71.4
2010	39	23	39.1	9	60.9	14	60.9
2011	41	28	50.0	14	50.0	14	50.0
2012	35	25	28.0	7	72.0	18	72.0
2013	35	22	27.3	6	72.7	16	72.7
2014	34	8	50.0	4	50.0	4	50.0
2015	32	21	38.1	8	61.9	13	61.9
2016	39	27	77.8	21	22.2	6	22.2
2017	40	20	95.0	19	5.0	1	5.0
2018	41	25	88.0	22	12.0	3	12.0
2019	43	21	52.4	11	47.6	10	47.6
Total	541	291	49.8	145	50.2	146	50.2

表1に2006年から2019年までの観測日数とイベント数を示す。富士山頂における日の出・日の入時刻より日中イベント(5~19時)と夜間イベント(19~翌5時)に分け、日中・夜間別の回数・割合も示す。この結果より、2011・2014・2019年を除いた2007年から2015年では夜間イベントが60%以上みられ、2006・2016~2018年では日中イベントが70%以上あることが分かった。ここから、年々日中イベントの割合が高くなっていることが確認された。

次に、年毎に違いが現れる日中・夜間イベントに着目し考察する。日中と夜間のイベントの特徴を見るために、イベント観測開始時刻の頻度を図3に示す。図3から、日中イベントは8時、12~13時と2つ、夜間イベントは20時に1つのピークを持つことがわかった。このことから、NPFイベントに3つの主要なプロセスがあると考え、以下で考察する。

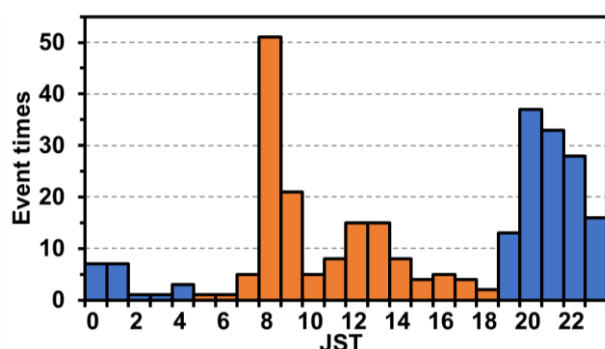


図3 2006~2019年に観測されたイベントの観測開始時刻

日中・夜間問わず成長時間が2時間以上のイベントが8割を占めていた。この結果から、NPFが発生した場所が広域かつ継続的に起きていることが示唆された。また、NPF

によって生成された粒子が輸送過程中に雲凝結核(80 nm ~)まで成長する様子も観測され、富士山頂付近における雲の放射特性も変える可能性があることもわかった。

イベント時の粒子の成長速度(GR)を算出することでNPFによって生成された微粒子の成長度合いを調べた。GRを算出した結果、40回のイベントで有効な値が得られた。GRは1.7~9.9 nm/hとなり、夜間(3.9±1.2 nm/h)よりも日中(5.9±2.3 nm/h)の方が約1.5倍大きいことがわかった。この結果より、日中に発生した粒子の方が成長しやすいことが確認された。これは、日射があることで成長に必要な前駆ガスの発生や光化学反応の際の反応速度を上昇させるなどの成長しやすい環境が出来ていたことが示唆された。また、日中・夜間別にGRの頻度分布を見ると、日中には2つ、夜間には1つのピークが確認できた。このことから、日中には2つ、夜間には1つの主な成長過程があることが示唆された。

以下に、日中・夜間イベントの発生要因を詳しく調べた結果を記述する。日中イベントは主に光化学反応によりNPFが発生すると考えられるため、SO₂がOHラジカルと反応することで発生するH₂SO₄とイベントの関係を調べた。SO₂及び全天日射量を観測した2018年7月27日~8月22日の日中の硫酸濃度の推定を行った⁹⁾。その結果、イベントの発生前に高濃度の硫酸濃度が観測された。このことから、硫酸濃度が高いときにNPFが発生することが示唆された。また、硫酸濃度が上昇する要因の一つに浅間山(2017年7月20日)などの活火山からの噴煙の輸送が考えられる。

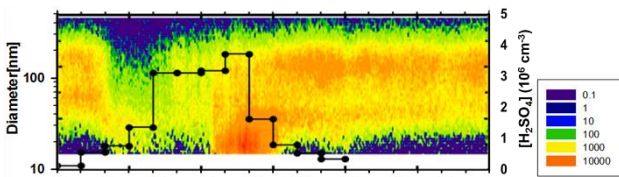


図4 日中イベント時(2018年8月2日)の粒径分布及び硫酸濃度変化

夜間イベント発生時にはSO₂濃度が低かったため、SO₂以外の要因でNPFが発生した可能性があることが示唆された。そこで、H₂SO₄が低濃度状態でもNPFが発生する条件の一つとして、大気中のVOCsが高濃度であることが考えられるため、イベント有無に分けて違いを調べた。その結果、夜間イベントが発生した時の方が、イベントが観測され

なかったときと比べて高濃度であることが分かった。このことから、富士山頂における夜間イベントは大気中のVOCs濃度が高い時に発生することが示唆された。また、後方流跡線を用いて高濃度のVOCsが観測された時の由来を確認したところ、多くが中部山岳域上空を通過していることが確認された。これより、日没前に中部山岳域で発生した谷風により富士山頂高度まで持ち上げられたVOCsを多く含む空気塊が富士山頂まで輸送される過程の中でNPFが発生したと考えられる。しかし、中部山岳域を通過しない空気塊でもイベントが観測されているため、発生要因の一つとして考えられることにとどまることに注意が必要である。

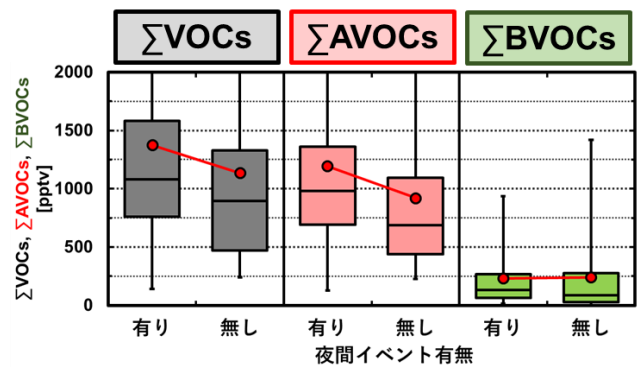


図5 夜間イベント有無別VOCs(=AVOCs+BVOCs)濃度

また、近年富士山頂での夜間イベントの観測割合が減少していることに関して、富士山頂において夜間観測されたイソプレン濃度の増加と夜間イベントの発生頻度の減少が似ていることが確認できた。このことから、近年夜間イベントの発生頻度が減少している要因の一つとして、大気中のイソプレン濃度の上昇が考えられる。イソプレンが増加する要因として、植生の変化や気温上昇などがあげられる。

その他の富士山頂でのNPFイベントの発生要因として、大気境界層及び自由対流圏の間にある混合層の上下動¹⁰⁾が考えられ、発生要因は複雑であることが報告されている。本研究では、日中での発生要因は高濃度の硫酸、夜間の発生要因は高濃度のVOCsであることがわかった。これまでの長期観測から、富士山頂におけるNPFイベントの発生要因が特定されつつあり、自由対流圏におけるエアロゾルの放射特性の理解に貢献できるかもしれない。

4. まとめ

2006~2019年の夏季に富士山頂において大気観測を行った。エアロゾル個数粒径分布の観測結果から、年々粒子数濃度が減少している傾向が見られた。その中でも、

核生成モード(粒径 25 nm 以下)の減少率が一番大きく、17.8%減少していた。そこから、富士山頂における NPF の発生頻度の減少や NPF により発生する粒子数濃度の減少が考えられた。その理由として、近年日本や東アジア圏で前駆ガスとなる人為起源ガスや微小粒子の排出量の規制が行われてきたことが要因の一つに挙げられる。

富士山頂で観測された NPF イベントは、全観測期間 541 日中 291 回観測された。その中でも日中イベントは 49.8% (145 回)、夜間イベントは 50.2% (146 回) だった。また、近年日中イベントが増加する傾向が見られた。イベントを発生時刻別に見ると、日中は 8 時・12~13 時、夜間は 20 時にイベント観測数のピークを持つことがわかり、主要な発生プロセスが 3 つあることが考えられる。成長時間別に見ると、2 時間以上成長しているイベントが 8 割以上確認できた。また、GR は 40 回のイベント中で算出でき、1.7~9.9 nm/h となった。また、夜間より日中の GR の値が約 1.5 倍大きいことがわかり、日射があることによって成長が早まり、雲凝結核になりやすいことが示唆された。

また、日中・夜間イベントの個別解析を行った結果、日中イベントは硫酸濃度、夜間イベントは VOCs 濃度が高濃度時にイベントが発生しやすくなることが示唆された。また、それらの増加要因として富士山及び中部山岳域で発生した谷風の影響が一つの要因であると考えられる。また、夜間の発生頻度が減った要因の一つに、VOCs を含む空気塊の中のイソプレン濃度が上昇したことによる影響が考えられる。

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施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行われました。本研究の一部は、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) M. Kulmala, T. Petäjä, T. Nieminen, M. Sipilä, H. E. Manninen, K. Lehtipalo, M. D. Maso, P. P. Aalto, H. Junninen, P. Paasonen, I. Riipinen, K. E. J. Lehtinen, A. Laaksonen & V. M. Kerminen (2012). Measurement of the nucleation of atmospheric aerosol particles. *Nature Protocols*, **7**, 1651-1667.
- 2) Shan-Hu Lee, Li-Hao Young, David R. Benson, Tanja Suni, Markku Kulmala, Heikki Junninen, Teresa L. Campos, David C. Rogers, Jorgen Jensen (2008). Observations of nighttime new particle formation in the troposphere. *J. Geophys. Res.*, **113**, D10210.
- 3) R. Zhang, A. Khalizov, L. Wang, M. Hu, W. Xu (2012). Nucleation and Growth of Nanoparticles in the Atmosphere. *Chem. Rev.*, **112**(3), 1957-2011.
- 4) S. E. Paulson, A. D. Sen, P. Liu, J. D. Fenske, M. J. Fox (1997). Evidence for formation of OH radicals from the reaction of O₃ with alkenes in the gas phase. *Geophys. Res. Lett.*, **24**(24), 3193-3196.
- 5) Shinji Wakamatsu, Tazuko Morikawa, Akiyoshi Ito (2013). Air Pollution Trends in Japan between 1970 and 2012 and Impact of Urban Air Pollution Countermeasures. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **7** (4), 177-190.
- 6) 鶴野伊津志, 王哲, 弓本桂也, 板橋秀一, 長田和雄, 入江仁士, 山本重一, 早崎将光, 菅田誠治(2017a). PM_{2.5} 越境問題は終焉に向かっているのか? 大気環境学会誌, **52** (6), 177-184.
- 7) Can Li, Chris McLinden, Vitali Fioletov, Nikolay Krotkov, Simon Carn, Joanna Joiner, David Streets, Hao He, Xinrong Ren, Zhanqing Li & Russell R. Dickerson (2017). India Is Overtaking China as the World's Largest Emitter of Anthropogenic Sulfur Dioxide. *Scientific Reports*, **7**, 14304.
- 8) M. D. Maso, M. Kulmala, I. Riipinen, R. Wagner, T. Hussein, P. P. Aalto, K. E. J. Lehtinen (2005). Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland. *Boreal Env. Res.*, **10**, 323-336.
- 9) S. Mikkonen, S. Romakkaniemi, J. N. Smith, H. Korhonen, T. Petäjä, C. Plass-Duelmer, M. Boy, P. H. McMurry, K. E. J. Lehtinen, J. Joutsensaari, A. Hamed, R. L. Mauldin III, W. Birmili, G. Spindler, F. Arnold, M. Kulmala, A. Laaksonen (2011). *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 11319-11334.
- 10) 片岡良太, 桃井裕広, 三浦和彦, 岩本洋子, 矢吹正教, 加藤俊吾, Indra Chandra, 瀬戸章文(2017). 富士山頂における新粒子の生成と成長. 第10回成果報告会講演予稿集, 45-46.

富士山山頂における花粉と花粉を宿主とした微生物の高度運搬の可能性

三木健司¹, 磯部洋明¹, 福間大起¹, 伊藤梓¹, 坂東日菜¹

1.京都大学, 2.京都市立芸術大学

1. はじめに

接地層より上部に巻き上げられた花粉は長距離輸送などを引き起こすと考えられ、花粉の大規模な飛散を理解するためには重要な研究対象である。

以上のことを踏まえ、本研究グループは高所飛散をしている花粉の存在の有無、花粉の種類や携帯の解析を目的とし、富士山山頂において花粉採取を行った。

2. 実験方法

富士山測候所(3,776 m a.s.l.)と山裾の基地(1,290 m a.s.l., 446 m a.s.l.)において、2019年8月6日午前11時から8月7日午前7時までの20時間にわたり花粉採取を行った。花粉のサンプルには山頂では Air-o-cell (EMLab P&K, Arizona, アメリカ合衆国)を用いた(図1)。吸引速度は10 Lmin⁻¹とした。山裾のサンプル地点については、Durham sampler を用いることで、重力法により花粉をサンプリングした。

3. 結果と今後の方針

昨年度の実験においては花粉の破片のみ採取できたが、今年度の実験において、初の完全な花粉粒子のサンプルに成功した(図2)。しかし、昨年の実験に比べ、捕集効率を向上しすぎたため、反対に花粉の破片がサンプルの中に含まれているのかを判別するのは困難であった。また、昨年度は山裾においてイネ科花粉を採取したが、今年度は頂上以外では花粉は採取されなかった。今後は今年度と昨年度の結果の違いが生まれた理由を考察し、より安定したサンプリングが出来るように実験モジュールを組む必要がある。また、花粉粒子はサンプルすることに成功したが、依然花粉の濃度が低すぎるため、サンプリング期間における富士山山頂高度における正確な花粉の飛散濃度を推定することは難しい。

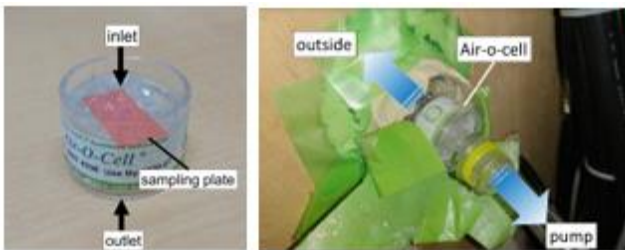


図1 Air-o-cell と実験セットアップ

雲がバイオエアロゾルを氷晶核とすると、無機物質を氷晶核とすると比ベ氷結温度が高いことが言われており¹、接地層より上層の大気におけるバイオエアロゾルの存在は、地球の気候システムに大きな影響を与えていると考えられている。また、対流圏上部や成層圏下部におけるバイオエアロゾルの飛散動態を理解することは、宇宙生物学的な目的としても重要な意味を持つ²。さらに、花粉を宿主とした微生物の存在が最近の研究により明らかになった³。このことから、高所における花粉の飛散を調べることで、微生物の長距離飛散の動態についても調べることが可能となる。以上から、これらの研究課題に対して重要な知見を得るためにも、今後とも持続した観測が必要である。

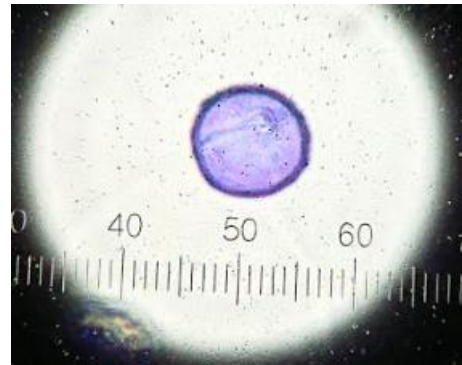


図2 2019年度の観測においてサンプルされた花粉

5. 謝辞

本実験は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行われました。また、認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」から学生実験への資金支援をいただきました。

本実験はJSPS科研費18J12315の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 幸島司郎 (2010). 空をめぐる微生物. *Earozoru Kenkyu*, 25, 43-47
- 2) Smith, D.J., Ravichandar, J.D., Jain, S., Griffin, D.W., Yu, H., Tan, Q., Thissen, J., Lusby, T., Nicoll, P., Shedler, S., Martinez, P., Osorio, A., Lechniak, J., Choi, S., Sabino, K., Iverson, K., Chan, L., Jaing, C., McGrath, J. (2018). Airborne bacteria in Earth's lower stratosphere resemble taxa detected in the

troposphere: Results from a new NASA aircraft bioaerosol collector (ABC). *Frontiers in Microbiology* **14**, doi.org/10.3389/fmicb.2018.01742.

3) Oteros, J., Bartusel, E., Alessandrini, F., Nunez, A., Moreno,

D.A., Behrendt, H., Schmidt-Weber, C., Traidl-Hoffmann, C., Buters, J.. (2000). Artemisia pollen is the main vector for airborne endotoxine. *J. Allergy Clin. Immunol.*, **143**, 369-5377

2019年富士山頂における大気中氷晶核および微生物組成の観測

村田浩太郎¹, 大河内博², 鴨川仁¹

1. 静岡県立大学, 2. 早稲田大学

1. はじめに

雲粒のように空中に浮かんでいる微水滴は-38°C程度になるまで氷の粒(氷晶)にならず過冷却状態で存在する。このような条件下で氷の核となり凍結を誘発する固体エアロゾル粒子を氷晶核という。大気中に存在する氷晶核の大部分は鉱物粒子であると言われており、最高-12°C付近で凍結を引き起こす。一方で、最も強力な氷晶核は細菌であり、最高-2°Cで凍結を引き起こすことができる。強力な氷晶核であるほど過冷却雲の氷晶化や降水の形成に重要な役割をもつため、上空に浮遊する細菌等の生物由来氷晶核について正しい理解と評価が求められている。

本研究では、富士山の自由対流圏高度・雲存在における生物由来氷晶核の存在を検証するため、氷晶核数濃度と浮遊微生物組成との関連性を調査した。

2. 方法

2019年7月14日から8月26日にかけて、3号庁舎外に滅菌済0.2 μm孔径ポリカーボネートフィルターを入れたフィルターホルダーを設置し、ポンプ吸引することで大気中浮遊粒子をろ過捕集した。採取流量は短期間採取(7-13時間)の場合は10 L min⁻¹、それ以上の長期間採取(10日以上)の場合は2 L min⁻¹に設定した。短期間採取の試料は11個、長期間捕集の試料は3個得られた。

フィルターは2分割し、半分は氷晶核数の計測、半分は細菌の遺伝子解析に使用した。氷晶核の計測はNOAAの液滴凍結法(Creamean et al. 2018)にわずかな改良を加えて行った。15 mL遠沈管に試料フィルターと超純水3 mLを加え、4°C環境下で3時間振とうして粒子を水中に懸濁させた。懸濁液から約2.5 μLの小水滴100個を冷却プレート上に作成し、-30°C付近まで冷却したときの水滴の凍結割合の変化から氷晶核数を算出した(Vali, 1971)。細菌の遺伝子解析は株式会社ファスマックに委託し、次世代シーケンス(Illumina Miseq)によって試料に含まれていた細菌16S rRNA遺伝子のv4領域の配列データを取得した。得られた配列は微生物解析ツールであるQIIME 2を用いて細菌組成を推定した。

3. 結果と考察

7月14日11時から8月12日13時までの中の富士山頂における温度別の氷晶核数濃度と細菌組成とを右図に示す(残り期間は解析未完)。期間中は徐々に氷晶核数濃度が上昇し、最後には全ての測定温度範囲で急激に数濃度

が増加した。富士山頂測候所では1972年~1976年にかけて氷晶核(-20°C, 水過飽和2%)の観測がなされており、7月と8月の平均氷晶核数は0.1 L⁻¹程度と報告されている(田中, 1987)。本研究における図の期間中の-20°Cにおける平均氷晶核数濃度は0.23 L⁻¹であり、桁として同程度であることを考えると、70年代から平均値に大きな変化はないと考えられる。

細菌組成については、おもにプロテオバクテリア門が優占していた。この門は全てアルファプロテオバクテリア綱とガンマプロテオバクテリア綱で構成されていた(グラフには示していない)。これらのプロテオバクテリアと、それに次いで多いバクテロイデス門は海洋細菌群集で比較的高い割合で検出されるため、海洋気塊の影響を比較強く受けているのではないかと考えられる。一方で、期間後半からファーミキューテス門、放線菌門、アシドバクテリウム門の割合が増えていた。一般的に、これらの門、とくにアシドバクテリウム門は土壌で高い割合で検出されることが多いので、期間後半は土壌を含む気塊の影響を受けていたのではないかと考えられる。終盤にかけて氷晶核数濃度が急増したことは土壌(鉱物)粒子が多く存在していたからではないかと考えられる。

また、生物由来氷晶核は熱で失活することが多いといわれているため、95°Cで加熱処理を加えて再度氷晶核を計測したところ-25°C~-7°Cでの氷晶核数が減少する現象が見られた。減少の温度や割合は試料により異なり、熱処理でほとんど変化しない試料もあったが、富士山頂においても生物由来氷晶核が存在していることが示唆された。今後、さらに細菌組成との対応を解析する。

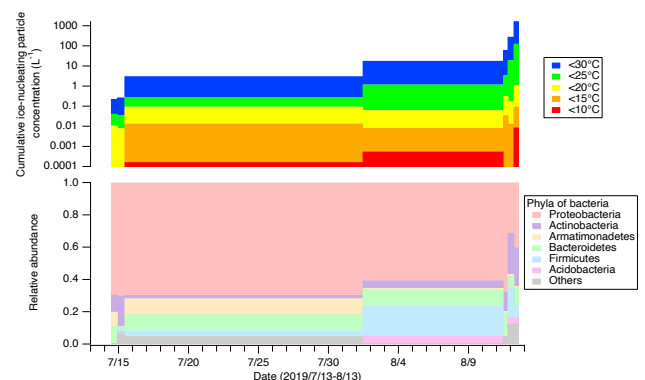


図:2019年7月14日から8月12日にかけての温度別の氷晶核数濃度(上段)と細菌門組成(下段)。バーの幅は採取期間と対応しており、序盤と終盤は7時間~12時間の短期間採取で、中盤は17日と10日の長期間採取を行った。

富士山頂の風はどこから吹いてくる？ ～1分ごとに風向を見る～

○皆巳 幸也^{1,3}, 鴨川 仁^{2,3}

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

1. はじめに

NPO法人富士山測候所を活用する会では、自主事業として富士山頂での気象観測を行っている。これは、気象庁により観測されている気象要素が現在では気圧・気温・湿度・日照時間に限られている一方で、大気化学・物理や大気電気に関わる観測の現場としては降水量や風向・風速などのデータが不可欠なため、それらの観測を自らの手で行うのである。従って、本来の目的は研究者の各グループに提供することではあるが、その中で気象条件そのものについても知見を得るべく、今回は短い時間間隔で観測した風向について解析を行った。これにより、例えば山頂が自由対流圏に相当する環境にあるか、或いは山谷風は影響するのか、などについての情報が得られるものと期待される。

2. 観測の概要

測器は Vaisala 社の複合気象センサ WXT533 で、3号庁舎の西面に張り付く形でアングルを組んだ足場状の工作物に支柱を取り付け、その上へセンサを突き出させた。本センサは風向・風速(超音波式)と降水量(雨滴の衝撃を電圧感知する方式)が観測できるものであり、風向は1分ごとの平均値、風速は1分ごとの平均値と最大値、降水量は1分ごとの積算値をロガーに記録したのち逐次ダウンロードした。

観測期間は2019年7月10日13:00～8月21日10:00で、1分ごとのレベルで欠測は1回のみであった。また、要注意データとして風速の平均値と最大値が同じである時間帯を抽出したところ、その間は風向も全く変わらない状態が続くというデータであったため、念のため解析からは除外した。そのような状況は都合9回あったが、いずれも30分以内で正常な状態に自己復帰していた。そうした不具合や復帰の原

因は不明である。

3. 結果および考察

まず、観測期間全体の風配図(n=60,084)を図1に示す。西寄りの風が高頻度であることが明瞭であり、西北西～西南西の頻度が全体の約35%を占めた。これは、山頂が偏西風帯の自由対流圏に位置することが多いという状況を反映した(裏付けた)ものと考えられる。そのほか、南東からの風も比較的多くなっており、これには台風(6号・10号)の影響も考えられるが、次で示すように他の要因も関わっているようである。

次に、観測期間の約40日を10日ごとに区切った中で、他とは異なる特徴が見られた8月1日～10日の風配図を図2に示す。この期間は上述の南東風が最も高頻度となっていたが、上述の台風をはじめとした総観場(大規模場)には南東風をもたらす要因は見られなかった。むしろ、この期間は概ね太平洋高気圧の勢力下にあつて(そのため下界では猛暑となった)総観的には風が弱い(吹かないとまでは言えない)状況であった。

そこで、上記の状況が最も典型的と思われる8月3日について、5:30と17:30を境に1日を3つの時間帯に分けて作成した風配図を次ページの図3(a,b,c)に示す。図より、明け方までは南東、日中は北東ないし東北東、夜に入ると南西ないし西南西の風が卓越していたことが判る。但し、風速はいずれも1～2m/秒であることが多く、最大で約3m/秒というものであった。また、近傍にある河口湖では、ウインドプロファイラによる高度4,000m付近の観測結果(図は略す)は1日を通して北東から東の風(風速は5m/秒前後)であった。この

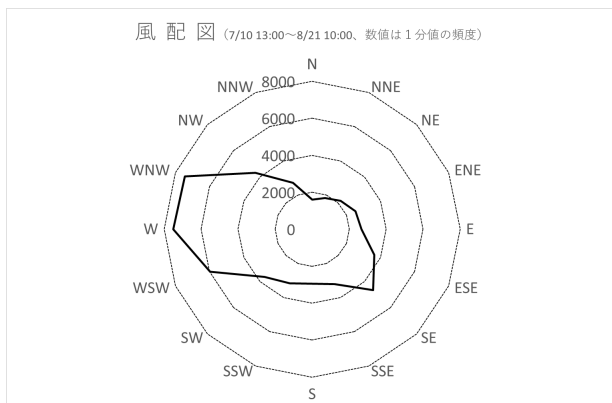


図1. 富士山頂における1分ごとの風配図
(2019年7月10日13:00～8月21日10:00)

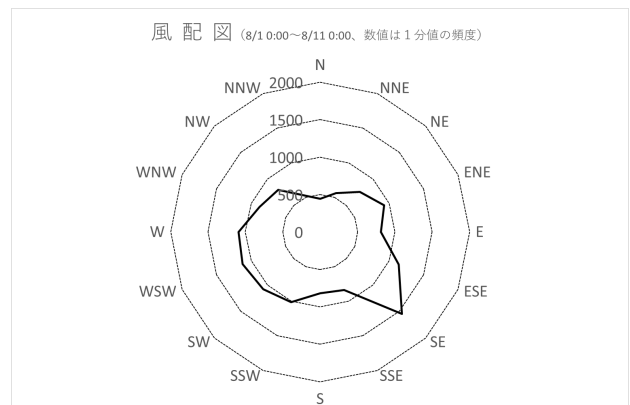
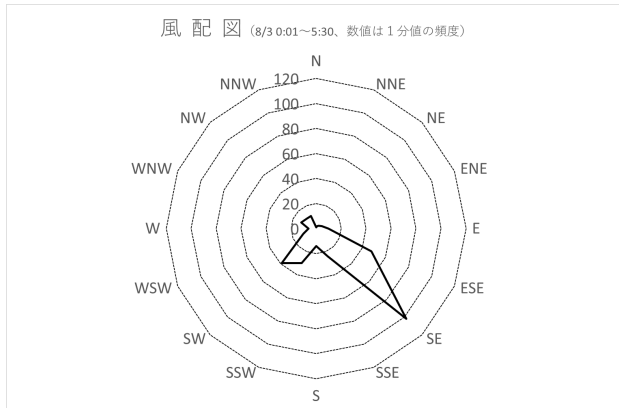


図2. 富士山頂における1分ごとの風配図
(2019年8月1日0:00～11日0:00)

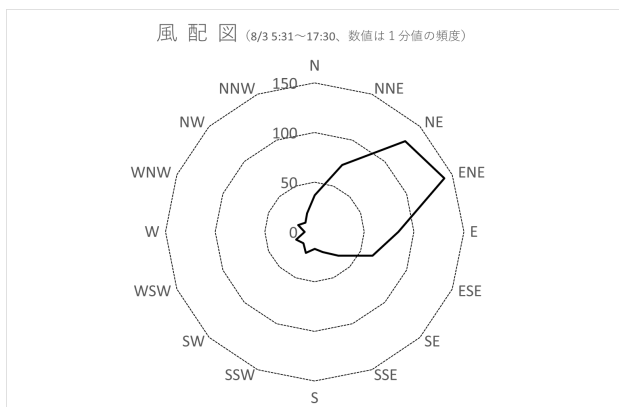
ことから、当日の夜間は局地的な(地形性の?)風が現れた可能性が考えられる。

現時点では限られた期間や日についての結果を議論するに留まっているが、今後は台風の接近時をはじめ強い風が吹いた事例も含めて解析を進めたい。

(a)



(b)



(c)

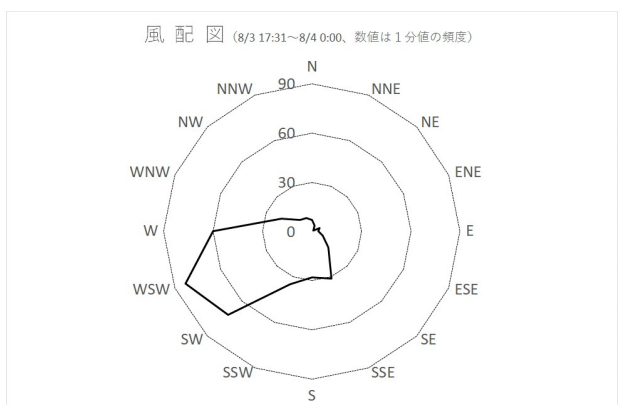


図3. 富士山頂における1分ごとの風配図

(a) 2019年8月3日 0:01~5:30

(b) 2019年8月3日 5:31~17:30

(c) 2019年8月3日 17:31~4日 0:00

旧富士山測候所への高速度上山時におけるパルスオキシメータによる

モニタリング結果

前田源次郎

秋田大学理工学部通信教育講座受講生

1. はじめに

旧富士山測候所のトライアル利用をチャレンジするにあたりブルドーザーでの上山をおこなうこととなりかつてない高速度での移動であることからトライアルで使用する予定であったパルスオキシメータ (Shenzhen Jumper Medical Equipment Co. Ltd. 製, JPD-500D) を用い心拍数, 酸素飽度, 灌流指数のモニタリングを急ぎよおこなった。本稿においては上山の状況ならびにモニタリング結果について報告するものである。

2. 旧富士山測候所への高速度上山時の状況

2019年8月18日, 6時に太郎坊拠点を出発し上山を開始した。当日の天候は, 薄曇りから小雨, 晴れ, 霧, 晴れと移り変わり, 車内に吹き付ける風の強さも大きく変わった。モニタリングは, JPD-500D を右人差し指に装着してブルドーザーが地図で後日に標高を確認可能な地点を通過する際に酸素飽度, 灌流指数, 脈拍数を読み取り事前に用意した記録用紙に記入した。気象庁中継小屋から馬の背直下までの間は, 激しい振動のためメモが取れなかったのとメータから出る音がオペレーターの支障にならないように電源を切ったためこの区間も ND となった。

高速度上山の状況ならびにモニタリング結果を表2-1に示す。また記録した結果をグラフにしたものを図2-1, 図2-2に示す。

日にち	時間	標高	酸素飽和度	灌流指数	脈拍数	地点名
8月17日	22:25	77	99	8.6	73	自宅
8月18日	16:00	440	98	7.2	79	御殿場観測サイト
8月18日	17:00	440	ND	ND	ND	御殿場観測サイト
8月18日	18:00	440	98	4.7	77	御殿場観測サイト
8月18日	19:00	440	98	7.4	76	御殿場観測サイト
8月18日	20:00	440	ND	ND	ND	御殿場観測サイト
8月18日	21:00	440	ND	ND	ND	御殿場観測サイト

表2-1-1 酸素飽度, 灌流指数, 脈拍数のモニタリング結果 (上山開始前)

※トライアル利用時に使用予定であった反射時間の測定はしていたが, この時に酸素飽度などの測定は失念していたので ND となった。エクセルからの貼り付けの関係でそのまま載せる。

日にち	時間	標高	酸素飽和度	灌流指数	脈拍数	地点名
8月19日	6:00	1300	93	2.9	84	太郎坊観測サイト
8月19日	6:35	1480	96	9.8	75	大石茶屋
8月19日	7:02	2830	96	4.5	68	旧4合目
8月19日	6:52	1900	93	9.5	68	次郎坊
8月19日	7:26	2892	90	7.3	82	旧六合目小屋跡
8月19日	8:02	3133	94	4.5	89	七合目下山道交点
8月19日	8:15	3300	89	2.5	80	気象庁中継小屋
8月19日	9:00	3725	ND	ND	ND	馬の背直下
8月19日	10:00	3776	80	1.9	111	旧富士山測候所
8月19日	11:00	3776	61	ND	ND	旧富士山測候所

表2-1-2 酸素飽度, 灌流指数, 脈拍数のモニタリング結果 (上山開始から終了)

※気象庁中継小屋付近でトイレ休憩をしたが, 心拍数の低下はそのためと思われる。

3. モニタリングを振り返って (紙面の関係で2. の図表の間に記載する。)

今回は, 限られた時間と資金で準備をしなければならなかったのと不慣れであったこともあり前日夜の御殿場観測サイトと当日の上山途中でのモニタリングデータが一部得られていないなど不備も多かったが高速度での上山による身体の反応をおぼろげながらも記録できたのは大きな収穫であった。激しい振動下で移動中に酸素飽度や灌流指数, 脈拍数を確実に記録するためには手書きではなく何らかの形で電磁氣的に記録する機材を確保しなければならないが可能であれば挑戦したいと思う。

またこのようなモニタリングをするにあたっては位置情報 (緯度, 経度, 高度) の取得・記録も必要となるがこれらの情報を得るのに前述と同様に激しい振動下でも確実に動作可能であることが求められるのでこれらについて検討していきたいと考えている。本来の目的であった自作装置による反射神経の計測は, 測候所到着後におこなったメータでの計測結果酸素飽度が非常に下がっていることが分かり大事を取り当日のうちに徒歩で下山したためできなかったが下山後に自宅で使用したところ正常に作動したので富士山頂へブルドーザーで輸送しても壊れない物を作るという目標は達成できたことを合わせて報告したい。

4. 謝辞

今回のトライアル利用に際して協力をしていただきました認定NPO法人富士山測候所を活用する会の関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。ありがとうございました。

本研究はNPO法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれた。

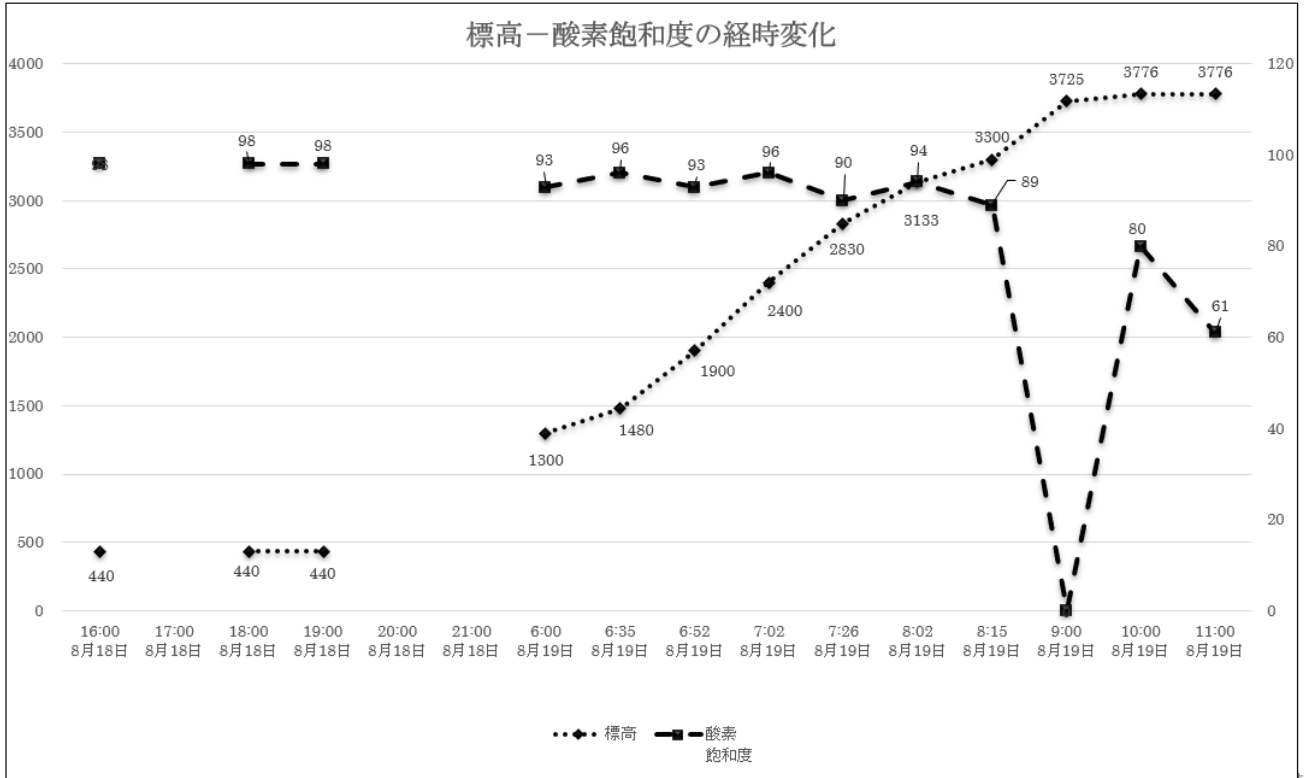


図2-1 標高一酸素飽和度の経時変化

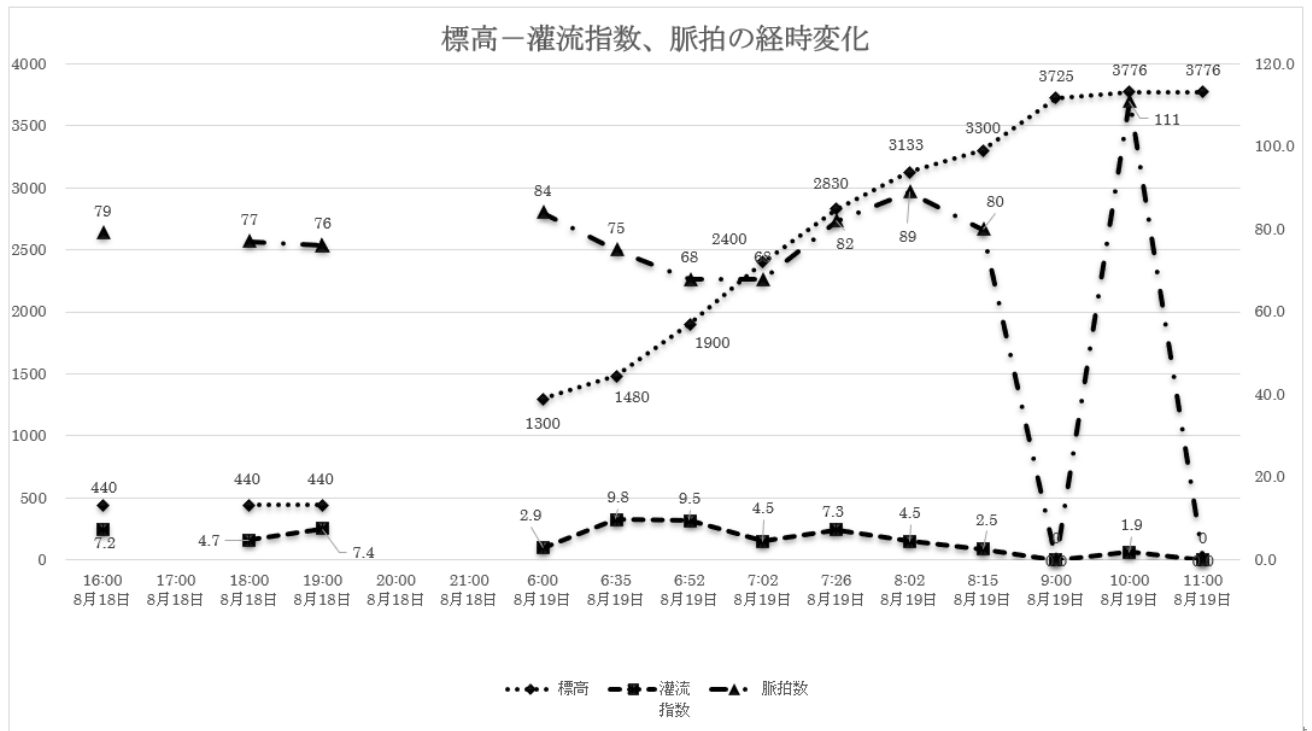


図2-2 標高、灌流指数、脈拍の経時変化

富士山チャレンジ 2019 実証実験報告

田中義朗¹, 安永隆一¹, 畠中雅弘¹, 福崎昭伸¹, 鴨川仁²
 1.一般社団法人富士山チャレンジプラットフォーム, 2.静岡県立大学

1. はじめに

当研究プロジェクトは、多くの登山者が犠牲になった平成26年9月の御嶽山噴火での事故を教訓として、毎年夏山シーズン中に訪れる約20万人以上の登山者に対して活火山への登山というリスクの認知度を向上させるとともに、特定の時間帯での登山者の過密状態を解消するために登山者の動態データを収集し「見える化」することで行動変容を促していくことを目指す取り組みである。

この取り組みは2015年より登山者の安全対策を目的として始めたもので、登山者の動態データをリアルタイムで収集し可視化できるシステムの実用化にむけて実証実験を通して様々な課題や技術的問題を確認している。昨シーズンに引き続き、剣ヶ峰での登山者把握のため富士山測候所での機材設置を行った。

2. 実証実験概要

今シーズンは、8月17,18,24,25の週末4日間で、当期間の全登山者の約6割にあたる延べ11,042人のモニター登山者の協力をえて、①ビーコンを活用した登山者動態データの収集と分析、②ビーコンのQRコード読取による周知情報伝達を実施した。

(1) ビーコンを活用した登山者動態データの収集・分析

富士山登山道4ルートすべての5合目～山頂間の富士山測候所内ほか49箇所にてビーコン検知のためのレーザー機器(スマートフォン)を設置し、それぞれの箇所での登山者数把握と通過時間データを収集し、分析を行った。

(2) ビーコンのQRコード読取による周知情報伝達

ビーコンに貼付したQRコードをビーコン調査に参加した登山者に読み取ってもらい、専用のURLで混雑状況や個別のID入力による登山履歴の閲覧をした人数や、ポップアップメッセージの確認した人数の確認を行った。



図.1 富士山チャレンジ登山者位置把握システム概要図

3. 実証実験結果

(1) ビーコンによるデータ

登山者が所持したビーコンのデータでは、レーザーを設置した山小屋などの各ポイントでの「ビーコン番号」と「到着時間」、「出発時間」がクラウドへ伝送される。クラウド上では、それらの時系列のデータを整理分析し、各ポイント間の「移動時間」、各ポイントの「滞在時間」を算出する。

これらのデータを元に、登山者一人ひとりの登山速度や登山時間が明らかになり登山パターンの分類が可能になる。

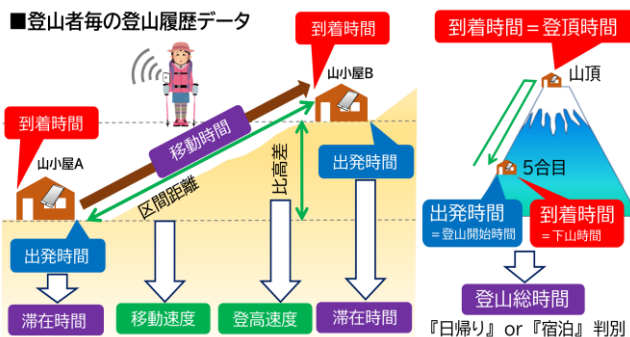


図.2 ビーコンにより得られるデータ

(2) 登山パターン分類

今回の実証実験でのデータからわかったこととして、富士山の登山パターンの傾向がある。富士山では「御来光登山」のイメージが強いが、実際の程度の人がどのような登山をしているのか実態把握されていなかった。

今回のデータを分析することで、「①宿泊御来光」、「②早朝発日帰」、「③午前発日帰」、「④夜発弾丸」、「⑤宿泊・御来光以外」の大きく5つのパターンに分類できた。

それぞれの割合をみると、約4割が「①宿泊御来光」と一番多く、それ以外は「②早朝発日帰」が約3割で、ケガ・事故の原因とされる「④夜発弾丸」は7.6%程度であった。登山道別でみると、日帰登山と宿泊登山の割合に違いがあり、登山道の環境やアクセスなどの違いが影響していると考えられる。

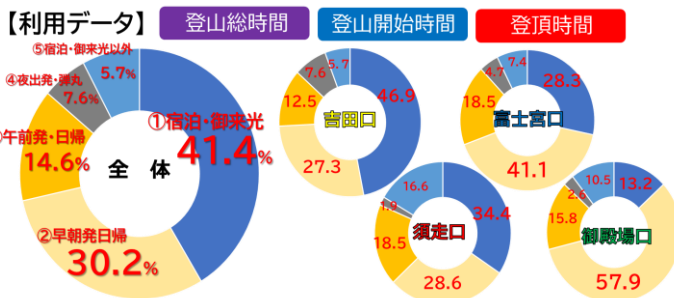


図.3 富士山登山パターン分類

(3) 剣ヶ峰登頂率

今回のデータを元に測候所のある剣ヶ峰への登頂率を算出した。期間中に山頂エリアまで到達した人数 6807 人中 剣ヶ峰まで行った登山者は 635 人とわずか 10%にとどまることがわかった。登山道別でみると剣ヶ峰に近い富士宮ルートからの登山者は 4 割近い登山者が剣ヶ峰まで行っている一方で、剣ヶ峰から遠い吉田ルートからの登山者は 2% 以下になっており、登山道別で大きく違いがあることがわかった。

表.1 剣ヶ峰登頂率

登山道	剣ヶ峰到達登山者数(人)	登頂者数(人)	剣ヶ峰到達率
富士宮口	515	1330	38.7%
御殿場口	25	70	35.7%
須走口	23	1126	2.0%
吉田口	72	4281	1.7%

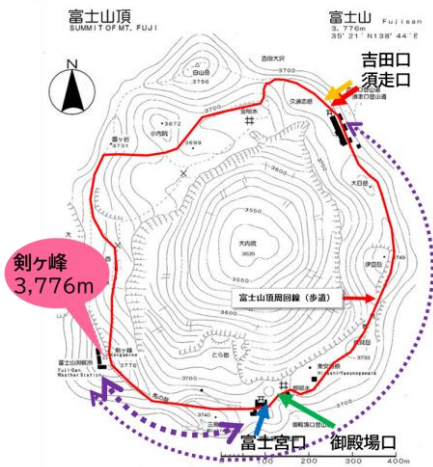


図.4 剣ヶ峰と各登山道の位置関係

(4) 登山速度

今回のデータを元に登山道別の登山速度(登高速度)を算出した。一番登山速度が遅かったのは吉田ルートで、一番早かった御殿場ルートでの 2/3 の速度であった。その理由としては、登山者が多く混雑しており、さらに登山初心者が多いことが考えられる。

表.2 各登山道別の登山速度(登高速度)

登山道	登山道延長 m (各5合目~山頂)	比高差 m (各5合目~山頂)	平均勾配 °	平均登高速度 m/時
富士宮ルート	5142.2	1391.5	15.9	241.0
御殿場ルート	10009.2	2274.2	13.2	303.3
須走ルート	6584.1	1617.8	14.4	235.8
吉田ルート	6695.9	1472.5	12.8	199.0

(5) 御来光時の山頂付近の速度低下

富士山では御来光時の山頂付近での登山者集中による「渋滞」が問題になっている。そこで今回のデータから、吉田ルート9合目~山頂区間の御来光時の登山速度の低下について分析を行った。結果としては、御来光時間帯の4時~6時の時間帯において、区間の平均速度の65%まで速度低下をしていることがわかった。速度低下は7時以降には解消しており、御来光時間帯にのみ登山者が集中し「渋滞」が発生していることが裏付けられた。

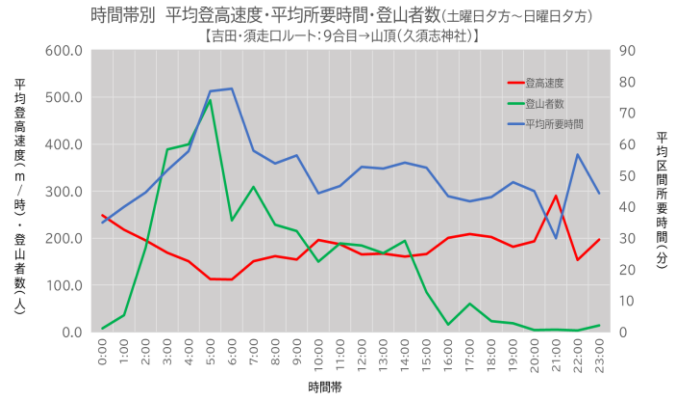


図.5 御来光時の登山速度低下

4. おわりに

今回得られた登山者の動態データの分析により、これまで定量的に把握できていなかった富士山登山の実態が部分的にはあるが明らかになった。特に登山パターンの特徴が見えてくることで、登山時の事故等のリスクを低減させる具体的で効果的な対策が実施でき、かつ経費の縮減にも寄与できる可能性がある。このようなデータに基づく意思決定や課題解決という「データドリブン」の導入を富士山でも進めて、より安全で環境負荷の少ない富士山登山環境の整備を行っていくことが求められる。

今後実証に向けて関係機関と協議していく予定である。

参考文献

- 1) 環境省関東環境事務所 (2019). 令和元年夏期の富士登山者数について(お知らせ).

富士山でのポータブルガスセンサーを用いた火山性ガスの測定

高橋智樹¹, 千島峻¹, 辰巳紘奨¹, 加藤俊吾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. 首都大学東京, 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

富士山は400年以上の間噴火していないが、活火山である。しかし、夏の間は毎年約30万人が登山を行っている。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、富士山登山道において火山性ガス(SO₂, H₂S)濃度が夏の間リアルタイムで様々なポイントで分かるようになれば、防災に役立てることができる。しかし、大気微量成分の観測には高価で大型の計測装置が必要であり、消費電力も大きいので、野外やポータブル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性ガスセンサーを用いて富士山登山道での火山性ガスのリアルタイム観測を実現することを目指している。登山者の安全を確保するため、ポータブル観測機での登山道の火山性ガス濃度の連続データ観測と多地点(山小屋)に定点野外観測機を設置することによるリアルタイム野外観測を行うことを目標としている。

2. 火山性ガスセンサーとデータ転送機器

火山性ガスセンサーは、Alphasense社のガスセンサー、SO₂-B4とH₂S-B4を用いた。実験室内におけるキャリブレーションでは、数ppb程度までのガスの検出が可能であった。また火山性ガスが常に排出されている大涌谷において、実大気中の火山性ガスに正しく応答した。(図1)

リアルタイム観測を行うために、富士山からデータを通信することが必要である。ソニー社のELTRESを用いて3分毎のデータ転送を行うようにした。ELTRESは、省電力かつ遠距離通信(Low Power Wide Area: LPWA)を行うもので、ソニー独自の通信サービスである。

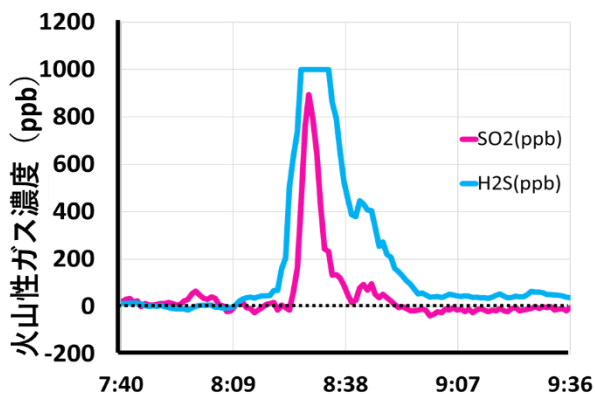


図. 1 大涌谷におけるセンサーシグナル

3. 登山道におけるリアルタイム連続火山性ガス濃度の測定

2つの登山道において火山性ガス(SO₂)のリアルタイム連続濃度を測定した。(図2)ポータブルのSO₂センサーとELTRESを用い、火山性ガス濃度データとGPSデータを取得した。ELTRESは登山道において3分1度の間隔で連続的に通信が可能であった。今年はより多くの登山道での観測を行い、より正確な登山道の火山性ガスのリアルタイム連続火山性濃度の測定を目指している。

4. 定点野外設置を目指した太郎坊でのテスト

夏季に山小屋にSO₂センサーとELTRESを含む観測システムを設置するために、山頂で越冬に成功しているシステムの小型化と防水防塵性の向上を行った。

富士山麓の太郎坊における野外定点設置では1か月半の長期野外観測に成功した。これは富士山が登山者向けに開放されている期間をカバーするものである。このシステムを山小屋数カ所に設置することによる、観測ポイントの多点化を、目指している。

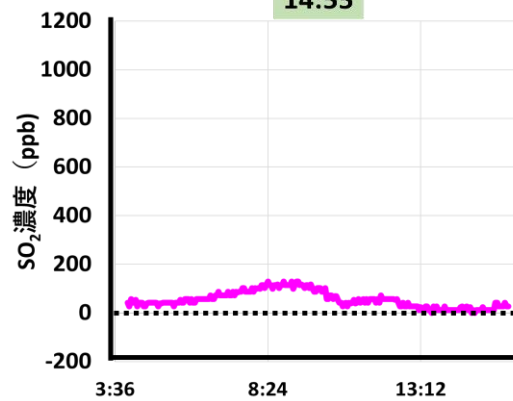


図. 2 登山道におけるSO₂濃度

富士山頂および山麓におけるエアロゾルの散乱係数

田中賢人¹, 乾諒介¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 矢吹正教², 桃井裕広³

1.東京理科大学, 2.京都大学, 3.千葉大学

1. はじめに

大気中を浮遊する微粒子であるエアロゾルは、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放射特性を変化させる間接効果を通して地球の放射収支に影響を与えている。しかし、放射強制力の見積もりには不確実性が存在する。したがって、放射強制力の理解を深めるためにはエアロゾルの光学特性の理解が重要である¹⁾²⁾。

本研究では2018年、2019年の夏季における富士山頂および山麓でのエアロゾルの粒径分布と散乱・吸収係数の観測し、単一散乱アルベド SSA の算出と後方流跡線解析を行った。

2. 方法

富士山山頂(138.72E,35.36N,標高 3776m)および山麓(138.80E,35.33N,標高 1290m)においてエアロゾルの粒径分布と散乱・吸収係数を測定した。期間は2018年7月11日から8月22日と2019年7月10日から8月28日である。

試料大気を拡散ドライヤーを通して相対湿度 30%以下まで乾燥させ、観測装置に通した(図1)。観測装置は粒径毎のエアロゾル数濃度を測定する光散乱式粒子計数器(Rion, KC-01, OPC), 散乱係数を測定する積分型ネフェロメータ(Radiance Research, M903, INEP), 吸収係数を測定するフィルター式光吸収計(Radiance Research, PSAP)である³⁾。

また, NOAA Hysplit model の後方流跡線解析を行い,

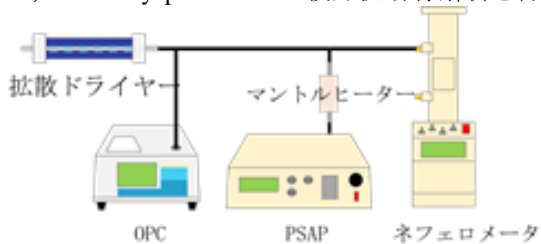


図1 観測装置

空気塊の由来を調べた⁴⁾⁵⁾。120時間内に空気塊が移動した軌跡をもとに日本、海洋、中国北部、中国南部、朝鮮半島の5通りに分類した。(図2)そして散乱係数、粒子数濃度、散乱効率の由来による特色を調べた。散乱効率は単位断面積当たりの散乱係数に相当し、粒子の光学特性を示すパラメータである。

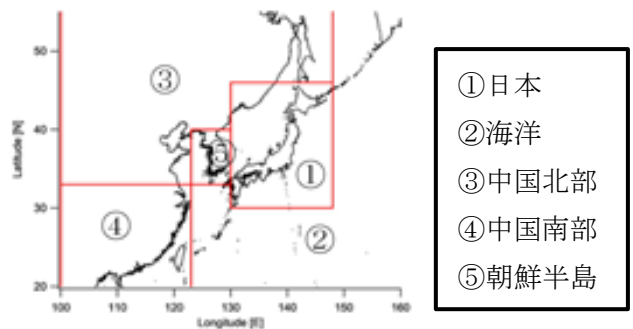


図2 空気塊由来の分類

3. 結果・考察

測定した粒子数濃度と散乱係数の結果を箱ひげ図にまとめた(図3)。粒子数濃度、散乱係数とも山頂同士、山麓同士で同程度の値であった。粒子数濃度からは、山頂において日中の粗大粒子が増加していることがわかった。

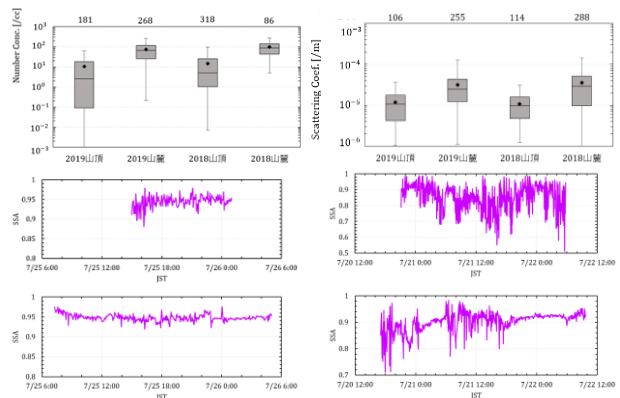


図4 単一散乱アルベド

(左上:2019年山頂 左下:2019年山麓, 右上:2018年山頂 右下:2018年山麓)

次に測定した散乱・吸収係数から算出した単一散乱アルベドは図4のようになった⁹⁾。2019年の山頂と山麓において、観測期間の単一散乱アルベドは大きな変化をせず、平均値はともに0.95であった。2018年の山頂では値が短期間に大きく変化していて、約0.5まで低下しているときもあったが、平均値は0.85であった。2018年の山麓では、山頂ほどではないが大きく変化をする時間があった。平均値は0.90であった。

次に、散乱係数を由来別に分けた結果(図5)、海洋由来の値が日本や中国北部由来のものよりも小さいことが分かった。粒子数濃度を由来別にみると、散乱係数と同じように海洋由来は値が低く、日本や中国北部由来のものは相対的に高い値だった。続けて散乱効率を由来別に示した(図6)。4種類の測定結果で共通の傾向はなかった。以上の結果から、海洋由来の散乱係数が低かったのは、由来による粒子の種類ではなく、粒子の量が主な原因であったと考えられる。

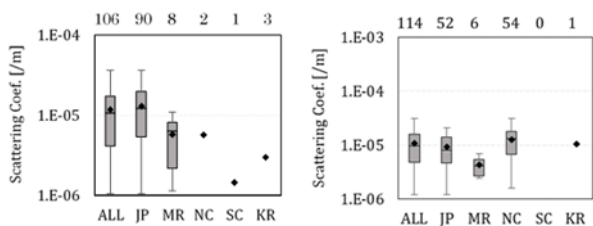


図5 山頂における由来別の散乱係数
(左:2019年 右:2018年)

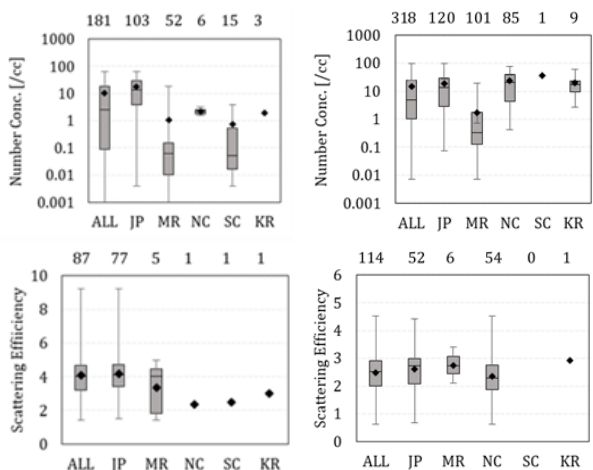


図6 山頂における由来別の粒子数濃度(上)と散乱効率(下) (左:2019年 右:2018年)

4. まとめ

本研究では富士山山頂および山麓でエアロゾルの粒子数濃度、散乱・吸収係数の測定をした。

粒子数濃度と散乱係数は山頂同士、山麓同士で同程度の大きさだった。また、山頂では日中に粗大粒子が増加していた。

測定した散乱・吸収係数から単一散乱アルベドを算出した結果、吸収係数が安定していた2019年の山頂山麓では平均値がともに0.95だった。2018年は吸収係数に伴う形で大きく変動したが平均値は山頂山麓それぞれ0.85と0.90であった。

後方流跡線解析により散乱係数の由来を分類すると、海洋由来が小さかった。粒子数濃度と散乱効率を由来別にすると、散乱効率は共通する違いはなかったが、粒子数濃度は海洋のみ低かった。これより由来による散乱係数の差は粒子数の差が主な原因だったと推測される。

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施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行われた。

参考文献

- (1) 乾涼介:認定NPO法人 第13回成果報告会 要旨,P-05,2019
- (2) IPCC 第5次評価報告書第1作業部会報告書 政策決定者向け要約,
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wgl_spm_jpn.pdf ,p.18,2013
- (3) 乾涼介:2018年夏季の富士山頂及び山麓におけるエアロゾルの光学特性,東京理科大学2018年度卒業論文
- (4) 新田雅人:神楽坂における都市大気エアロゾルの光学特性,東京理科大学2016年度卒業論文
- (5) 中崎翔太:富士山頂におけるエアロゾルの光学特性,東京理科大学2013年度卒業論文
- (6) 中原勇希:都市大気エアロゾルの単一散乱アルベドの特性,東京理科大学2012年度卒業論文

高所滞在中の血行動態に自律神経が及ぼす影響についての検討

小森孝洋¹, 金澤英紀², 星出聡¹, 苅尾七臣¹

1.自治医科大学内科学講座循環器内科学部門, 2.自治医科大学放射線医学

1. はじめに

登山行動中の死亡事故は多く, 内因性疾患として心血管疾患の発症が多くを占めている. その原因として登山行動, 高所曝露による血圧変動が挙げられるが, どのような血圧変動が生じるかは明らかになっていない.

高所環境は自律神経に影響を及ぼすことが知られており, 交感神経活性が亢進し, 結果として肺高血圧や体血圧の上昇が生じることが報告されている¹. 我々は, 富士登山中の血圧日内変動に注目して研究を行ってきており, 高所環境滞在時及び高山病発症時には夜間の血圧上昇をきたすことが多く, 交感神経活性亢進がそれに関与している可能性を報告した.

起立動作は簡易な動作で自律神経に影響を与える負荷試験である. 高所環境では起立性低血圧が平地よりも増強したとの報告があるが², 起立性の血圧変動, 心拍変動については高所と平地での違いは十分に明らかになっていない. 我々は, 起立性の血圧・心拍変動により得られる自律神経機能と血圧日内変動は関係し, 高所と平地で違いが生じると仮説を置き, 研究を行った.

2. 方法

(1)対象:心血管疾患のない健康人5名

(2)方法:富士山五合目(標高 2305m)から吉田ルートを経て山頂登頂(標高 3776m)し, 富士山頂の富士山測候所に宿泊する. 翌日は五合目まで下山する. この行程の間, 24時間血圧測定を行い, 登山行動中の血行動態を記録する. さらに酸素飽和度の測定を, 行動中随時と就寝中に行う. 富士山測候所滞在中に起立性の血圧・心拍変動を記録する.

登山日とは別の日程で日常生活時の起立性の血圧・心拍変動と24時間血圧測定を記録する.

評価項目:登山行動中の24時間血圧モニタリング(気圧計, 気温計, アクチグラフを内蔵するマルチセンサー自由行動下24時間血圧計を用いる.), 起立性血圧・心拍変動(クロスウェル社 きりつ名人を使用), レイクルイーズ高山病スコア, SpO2モニター(登山行動中適宜, 夜間就寝中は連続的に測定), 登山行動内容の記録, 気象条件(気温, 気圧)の記録, 日常生活時(非登山行動中)の24時間血圧測定
判定項目:個人間での登山時・日常生活時の起立性血圧・心拍変動の差,, 24時間血圧変化の差.

3. 結果

令和元年8月10日~11日に研究を実施した. 対象者は

健康人5名(男性5名). 職業は医師3名, 会社員2名である. 登山行動中, マルチセンサー自由行動下24時間血圧計を装着して行動した. 表1に被験者の背景を示す.

表1. 被験者背景

	年齢(歳)	性別	レイクルイーズスコア
被験者 A	42	男	6
被験者 B	37	男	2
被験者 C	26	男	2
被験者 D	27	男	4
被験者 E	37	男	7

富士登山中と日常生活での血圧値の比較を表2に示す. 富士登山中は被験者 E のみ血圧変動パターンが Non-dipper 型を呈したが, 被験者 A,B は Dipper 型, 被験者 C, D は Extreme dipper 型であった.

日常生活での血圧変動は被験者 A, B, C, D で Extreme dipper 型, E で Dipper 型を呈した.

表2. 血圧・脈拍値

	登山中 (N=5)	日常生活 (N=5)	p- value
24hSBP (mmHg)	119±8	119±10	0.92
24hDBP (mmHg)	77±5	79±8	0.71
24hHR (bpm)	87±6	65±8	<0.01
awakeSBP (mmHg)	127±11	126±10	0.87
awakeDBP (mmHg)	83±8	85±8	0.73
awakeHR (bpm)	93±5	70±9	<0.01
sleepSBP (mmHg)	103±8	102±8	0.84
sleepDBP (mmHg)	64±4	64±5	0.94
sleepHR (bpm)	73±9	53±9	0.01

起立試験の結果を表3に示す. 富士登山中の起立試験では, 立位の血圧が高値となる起立性高血圧の状態であったが, 日常生活では起立による血圧変動は認められなかった. 起立試験中の交感神経活動を表す ccvL/H は, 安静時と起立時, 着席時に富士登山中において有意に高値を呈した. 副交感神経活動を表す ccvHF は, 安静時, 着席時に富士登山中において有意に低値を示した.

表 3. 起立性の血圧, 心拍変動

	登山中 (N=5)	日常生活 (N=5)	p-value
座位 SBP (mmHg)	110±11	112±9	0.79
座位 DBP (mmHg)	69±10	73±5	0.46
座位 HR (bpm)	82±21	64±13	0.14
立位 SBP (mmHg)	118±11	112±10	0.43
立位 DBP (mmHg)	75±5	73±5	0.53
立位 HR (bpm)	87±11	71±13	0.07
立位—座位 SBP (mmHg)	7.6±14.6	0.2±8.8	0.36
立位—座位 DBP (mmHg)	6.0±6.6	0±3.7	0.12
立位—座位 HR (bpm)	4.8±12.0	6.4±3.2	0.78
ccvL/H 安静 (%)	0.384±0.161	0.122±0.054	0.02
ccvL/H 起立 (%)	0.634±0.098	0.332±0.161	<0.01
ccvL/H 立位 (%)	0.504±0.162	0.364±0.182	0.24
ccvL/H 着席 (%)	0.424±0.106	0.242±0.099	0.02
ccvHF 安静 (%)	0.950±0.335	1.496±0.362	0.04
ccvHF 起立 (%)	0.786±0.239	0.976±0.250	0.25
ccvHF 立位 (%)	0.576±0.218	0.678±0.213	0.48
ccvHF 着席 (%)	0.824±0.216	1.170±0.253	0.049

4. 考察

富士登山中と日常生活中で24時間血圧測定および起立性血圧変動・心拍変動の評価を行った。24時間血圧レベルは、富士登山中と日常生活中で差はなかったが、富士登山中には起立性高血圧が認められ、起立時の LF/HF が高値であった。本研究からは交感神経機能が高所滞在中には亢進しており、特に起立時に顕著に亢進することが示された。血圧日内変動や血圧レベルも交感神経の影響を受けることが考えられるが、血圧日内変動と交感神経指標の間には一定の関係は認められなかった。

高所滞在中は交感神経活性の亢進が生じることが知られており、循環動態に影響が生じる⁹⁾。肺血管の収縮による肺高血圧や体血管収縮による高血圧などがそれに当たる。本研究では自律神経系への負荷試験として、起立試験を行うことで交感神経系の活性亢進を確認することができた。起立時には、下肢に血液が貯留し、心拍出量の減少が生じ、瞬間的な血圧の低下が生じるが、それを頸動脈の圧受容体は感知し、また、左心室の容積減少も心臓の受容体で感知され、中枢神経へシグナル伝達が起こり、交感神経が緊張す

ることで起立時の血圧が維持される。この反射は秒・分の単位で生じる。高所では低酸素により交感神経が平地よりも緊張した状態であると考えられるが、起立負荷により交感神経緊張を増強すると、その反応が平地よりも増強されることが本研究により明らかになった。

本研究では血圧日内変動と起立性血圧変動に一定の傾向が認められなかったが、高血圧患者を対象とした研究においては、起立性低血圧と Riser 型血圧日内変動、起立性高血圧と Extreme dipper 型血圧日内変動の関係が報告されている³⁾。高所環境での血圧日内変動と起立性血圧変動の関連性は十分に明らかになっておらず、今後さらなる研究が必要であると考えられる。

本研究の限界としては、被験者数が少なかったため、高所滞在中の交感神経活動にかかわる因子について十分検討することができなかったことが挙げられる。今後、被験者数を増やしていき、高所滞在中の自律神経に影響を及ぼす因子や、血圧日内変動と自律神経活動の関係についても考察していきたいと考える。

5. おわりに

高所滞在中は、起立性高血圧が生じ、交感神経活性が亢進していた。高所滞在中の交感神経活性は血圧と強く関連していることが推測されるが、今回の研究では十分に明らかにする事ができなかった。今後研究を積み重ねていき検討を進めたい。

参考文献

- 1) P Bartsch and JS Gibbs. (2007). Effect of altitude on the heart and the lungs. *Circulation*, **116**, 2191-202.
- 2) OT Mytton, A Simpson, AAR Thompson, RA Oram, A Darowski, L-M Yu, DJ Collier and AJ Pollard. (2008). Manual assessment of the initial fall in blood pressure after orthostatic challenge at high altitude. *Wilderness Environ Med*, **19**, 225-232
- 3) GP Sogunuru, K Kario, J Shin, CH Chen, P Buranakitjaroen, YC Chia, R Divinagracia, J Nailes, S Park, S Siddique, J Sison, AA Soenarta, JC Tay, Y Turana, Y Zhang, S Hoshida and JG Wang. (2019). Morning surge in blood pressure and blood pressure variability in Asia: Evidence and statement from the HOPE Asia Network. *J Clin Hypertens (Greenwich)*, **21**, 324-334.

富士山体を利用した自由対流圏および大気境界層における雲水化学特性(6)

○大力充雄¹, 大河内博¹, 中村恵¹, 勝見尚也², 皆巳幸也², 米持真一³, 三浦和彦⁴, 加藤俊吾⁵, 和田龍一⁶, 竹内政樹⁷, 戸田敬⁸, 土器屋由紀子⁹, 畠山史郎⁹

1.早稲田大学, 2.石川県立大学, 3.埼玉県環境科学国際センター, 4.東京理科大学, 5.首都大学東京, 6.帝京科学大学, 7.徳島大学, 8.熊本大学, 9.富士山環境研究センター

1. はじめに

富士山は孤立峰であり、山頂は自由対流圏高度に位置しているため、日本国内で排出された大気汚染物質の影響を受けにくい。そのため、日本上空の雲水中化学物質のバックグラウンド濃度とアジア大陸からの長距離輸送による越境大気汚染の影響を評価するのに最適である。ここでは、2006年から2018年まで富士山頂で採取した雲水中酸性物質と溶存態微量元素の長期トレンド、希土類元素を用いた越境大気汚染の影響について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

富士山頂(3776 m)での雲水採取には細線式パッシブサンプラー(臼井工業, FWP-500)を用いた。雲水試料は回収後、主要イオン分析用はポリプロピレン溶液に入れ、微量元素分析用はテフロン容器に入れて有害重金属測定用硝酸でpH3として密栓・冷蔵保存して研究室に持ち帰った。その後、0.45 μmメンブレンフィルターで吸引ろ過し、直ちにpHと導電率を測定した。主要無機イオン分析にはイオンクロマトグラフ(陽イオン:ICS-1000, 陰イオン:AQUION), 微量元素(Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Pb, 希土類元素14元素)はICP-MS(Agilent7700x), 水銀の分析は還元気化水銀測定装置(日本インスツルメンツ, マーキュリー/RA-3)で行った。

3. 結果と考察

図1に2006年から2018年における雲水中主要無機イオン, 溶存態微量元素の経年変化を示す。1段目のグラフは雲水体積加重平均pHと平均N/S比(硝酸イオンの体積加重平均当量濃度/非海塩性硫酸イオン), 2段目に主要無機イオン総濃度と化学組成の割合を示す。3段目に溶存態微量元素の全成分総濃度とその組成割合, 4段目に溶存態微量元素のうち, 副成分(主成分以外の10元素)総濃度と組成割合を示す。雲水pHとN/S比はばらつきがあるものの, 経年的にともに上昇傾向にあるが, 主要無機イオン総濃度には経年的な増加および減少傾向は見られなかった。10試料以上採取ができた年では, 主要

無機イオン総濃度は0.0549~0.371 μeq/Lであり, 低濃度を推移していた。後方流跡線解析によって, 大陸から輸送された空気を取り込んだ雲水はpHが低く, 主要無機イオンの総濃度が高くなるのが分かった。微量元素元素の主成分は年によらずAl, Fe, Znであり, 副成分ではMn, Cu, Pbの割合が高かった。全成分濃度および副成分濃度は2015年以降同様の変動を示した。また, 経年的な濃度の増加および減少傾向は見られなかった。

図2に2018年夏季の空気塊由来別の雲水中溶存態希土類15元素の総濃度と組成割合を示す。1段目のグラフは希土類元素の全成分総濃度と組成割合, 2段目は希土類元素のうち, 中・重希土類(軽希土類La, Ce, Pr, Nd以外の10元素)総濃度と組成割合を示す。雲水中希土類元素の主成分はCe, Y, Nd, Laであり, 大陸北部由来の雲水中希土類元素の総濃度(2.30 μg/L)は, 海洋由来の総濃度(0.04 μg/L)の約60倍であった。希土類元素の生産量は中国が世界全体の約80%を占めている1)ことから, 希土類元素は中国からの越境輸送の指標物質として有効である可能性が示唆された。

4. おわりに

夏季富士山頂における雲水の長期観測により, 越境大気汚染の影響は減少し, 大気質が改善傾向にあることが示唆された。

5. 参考文献

1) United States Geological Survey (2018), Mineral Commodity Summaries, 132-133.

連絡先: 大力充雄 (Mitsuo DAIRIKI) mitsuo-dairiki@fuji.waseda.jp

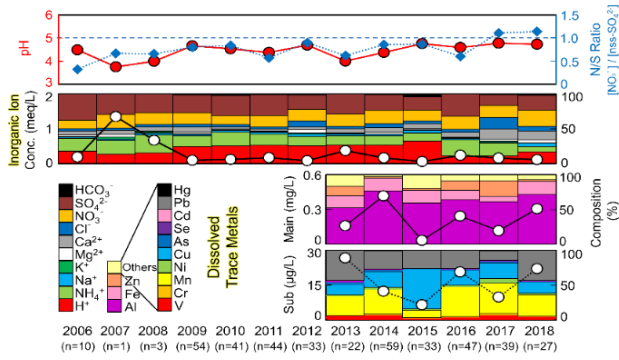


図 1. 夏季富士山頂における雲水 pH と N/S 比, 総主要無機イオンと金属濃度の経年変化

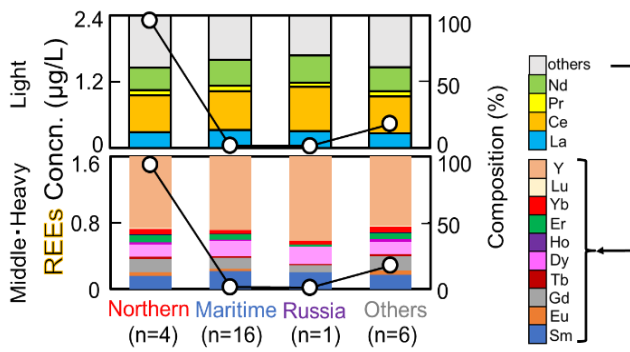


図 2. 2018 年夏季富士山頂における雲水中希土類 15 元素の総濃度と組成割合

富士山の永久凍土研究:経過観察 (2019 年)

池田 敦¹

1. 筑波大学

1. 概要

富士山山頂の永久凍土の現状を解明し、その地温変化をモニタリングすることで、将来、気候変化と火山活動の評価につなげることを目的とした研究の一環として、2010年に永久凍土をモニタリングする深さ約10mの観測孔(Hサイト、標高3750m)を設置した。2019年度に主に実施したことは、前年度に浸水と落雷で破損したHサイトの復旧作業である。観測孔内を温水で加熱して、孔内に凍結している破損センサーとバックアップ用小型ロガーの回収を目指したが適わず、残念ながら氷が孔内を満たしていることが明確になった。観測地には電源がなく、また狭く深い観測孔内に挿入できる熱源の手配も容易ではないため、凍結部の融解には時間をかけて融点の低い液体(不凍液)と混合させるしかないという判断に至った。不凍液と接することで、凍結部が徐々に融解していることはその後の調査で確認でき、今後、数年かけて融解させる予定である。

2. 2018~2019年の破損と復旧状況

2018年8月20日の現地調査によって、Hサイトのデータロガーは、おそらく落雷を受け、8月13日に停止したことがわかった。観測孔は、通常は周囲から液体・固体が入らない円筒管からできており、こうした故障時にはセンサーを引き上げられる仕様であった。ところが本来は中空のはずの孔内が凍結しており、破損センサーを回収できなかった。そこで孔内が凍結した要因をデータから検討した。観測孔周辺では、例年なら強風のために積雪がきわめて薄いですが、2018年3月上旬の高温期以降、たびたび地温の日変化を抑制させるだけの積雪があった。その積雪は、5月2日~3日にかけて、発達した低気圧による降雨で急激に融け、観測孔の目止めを破って流入し、孔内で凍結していた。

当初、浸水の度合いも不明で、9月にセンサー引き上げも見込んで観測孔に外気を循環させ加熱したが、まったく効果が得られず加熱方法を見直す必要があった。しかし、2018年は9月以降10月上旬まで天気がぐずつき、Hサイトでの作業はほとんどできなかった。ただ、季節的な表土の融解が最大化する無雪期末期(10月3日)に、1.5m深まで新たなセンサーを入れ、永久凍土層の上にある季節的な凍結

融解層は観測できるように戻した。また、翌冬のさらなる凍結を防ぐために不凍液を投入した。

2019年5月12日に観測孔の状態を確認したところ、ほぼ地表付近にて孔内が再凍結していた。しかし、その凍結部は(おそらく霜であった)深部には及んでおらず、6月1日には消失し、再び不凍液を投入できた。その際に持参した前年と同量の不凍液が入り、前年投入の不凍液はかなり揮発していたものと考えられた。

旧測候所を宿泊利用した8月17日には、前年10月に増設したセンサーをいったん外し、孔内の凍結面の深さを確認した。その結果、観測孔の外側は永久凍土層($\leq 0^{\circ}\text{C}$)である2.7m深まで液体となっており、不凍液側へ孔内の氷が少しずつ融け出していることが確認できた。このときHサイトでの自然状態の地温データ獲得はしばらく諦めることとし、さらに融解速度を上げるために温水を投入した。再度センサーを入れ経過を見たところ、その方法で3m深まで水温を急上昇させることができた。しかし、おそらく水の攪拌が難しいためもあり、それより先に融解が進む様子は認められなかった。そこで再凍結防止のためにいったん孔内の液体をポンプで吸いポリタンクに回収し、新たに不凍液を投入した。この時点で、あとは不凍液に任せて、時間をかけて融解させるほかはないと判断した。

9月17日に再度、増設センサーをいったん外して凍結面の深さを測定した。その結果は3.7mであった。同様に10月1日に再度計測し、3.9mまでの融解を確認した。揮発した分を補うため、不凍液をつぎ足した。

3. 今後の見込み

地表より深さ1m強までは、自然状態でも秋までに地盤は融けるため、前年秋から1年主に不凍液の効果で融かせた厚さは約3mである。この先さらに6mを融解させるためには、さらにたびたび不凍液をつぎ足して、よくて丸2年、実際は3年以上かかるのではないかと予想する。既存の破損センサーが抜けないため、孔内にセンサーをさらに増設する空間もなく、バックアップで埋設していたロガーの電池も残念ながら引き上げまで持たないものと予想された。

富士山頂および山麓における雲粒中の硫酸イオン定量

南齋勉¹, 片井遼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

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。雨雲は単一の気塊ではなく、移流過程において凝結核となるエアロゾルやガス成分、水蒸気の複雑な沈着過程を経て形成されるため、従来の採取法では、雨水が持つ詳細情報は失われている。このことから、雲や霧中での大気汚染物質の沈着過程や、雨や雲中における化学反応の解明には、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¹⁻⁵⁾、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^{6,7)}。未だ改善の余地はあるが、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。

本発表では、上記の新手法を用いた初の実環境試料のフィールド測定として、富士山山頂と富士山麓において雲粒のサンプリングをそれぞれ行なった結果について報告する。

2. 採取と観察

採取キット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。

富士山頂における採取は以下のとおり行なった。測候所建屋の西側に設置された大河内グループのハイボリュウムエアサンプラーのアルミ脚部分に、図 1a に示すように垂直方向に樹脂製パッドを据え付け、その上にサンプリングキットを貼付させた。2019 年 7 月 23 日 12 時から翌 24 日の 8 時まで 1 時間ごとに採取を行なった。

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) 上に図 1b のように採取キットを貼付し、7 月 25 日 9 時から 17 時まで高度 1440 m への計 5 回のフライト (flight time: 10-15 min) を行なった。

採取後、アルミジップロックに収納し、研究室にてデジタ

ルマイクロSCOPE (KEYENCE VHX-7000) で撮影し、画像処理ソフトを用いて、液滴径と、生成した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。

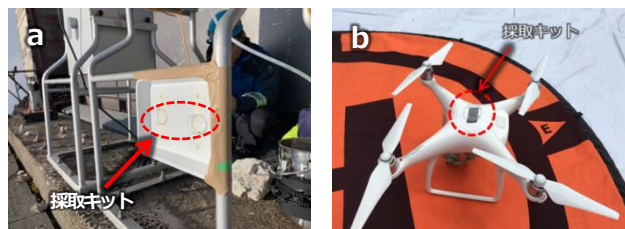


図1 サンプリングキットの設置状況(a 富士山頂, b ドローン)

3. 結果と考察

富士山頂におけるサンプリングでは、日中は数回、雲内に入ることがあったが他の時間帯は晴天が続いていた。採取後の採取キットを目視観察したところ、雲滴の採取痕は確認されたものの、非常に微小であることから結晶生成の確認はできなかった。24 日の明け方にかけては、小雨を含むような濃い雲に覆われ、顕著な採取痕が確認された。

デジタルSCOPEによる観察の結果、日中のサンプリングにおいては、液滴痕が確認され、その液滴径は 5-60 μm の範囲で 20-30 μm にピークを持っていた (図 2)。この粒径分布は、これまでに報告されている雲粒の粒径分布とおおよそ一致していた^{8,9)}。採取された雲粒痕の一例を図 3 に示す。明け方における濃霧時のサンプリングキットについても同様にデジタルマイクロSCOPEで確認したが、ゲル表面が凹凸状に歪んでおり、焦点を合わせる事が難しく、液滴痕も確認することはできなかった。多くの水分を採取しすぎたためにゲルの含水率が増大したことが考えられる。また、結晶生成については、いずれの採取キットにおいても確認できず、本採取キットでの硫酸イオン濃度の検出下限である 134 μM を下回る濃度であったことが分かった。

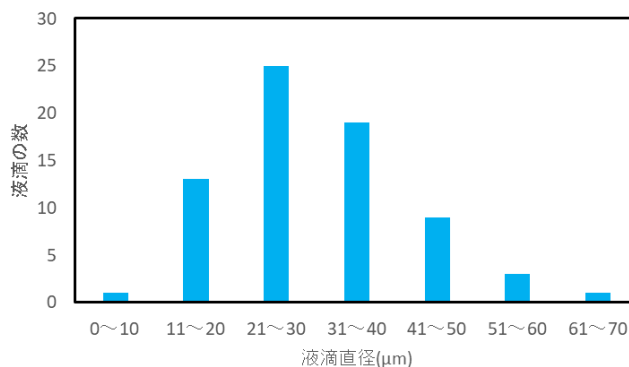


図2 富士山頂において採取された雲滴の粒径分布

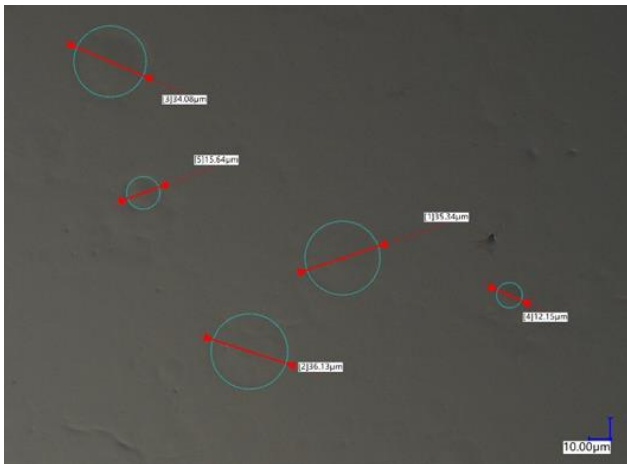


図3 富士山頂において採取された雲滴(7月23日13時採取)

次に、ドローン採取した状況について、朝方は雲底の低い厚い雲がサンプリングサイト上空にあり、昼前に一旦晴れたのち、午後の初めにかけて少量の降水があった。夕刻にかけて雲は徐々に薄くなり、雲高度も上昇した。結果として、1回目(7月25日9時)において最も顕著な雲滴痕が確認され、2回目(同9時45分)と3回目(同10時15分)においても、雲滴数は減少したものの雲滴痕が確認された。4回目(同11時)と5回目(同16時45分)の採取からは、雲滴はほとんど確認されなかった。これらの結果は、地上から見た雲の状況と良く一致していた。2回目以降のフライトにおいて採取された雲滴の粒径分布は数十 μm の範囲であり、富士山山頂で直接採取した粒径分布と似ていた。しかし、1回目の採取において、100 μm を超える大きな粒径の雲粒が多く観測され、100-120 μm にピークが見られた。

デジタルマイクロスコープにより、1回目のフライトの結果からは結晶生成も確認できた。図4にキット上に生成した硫酸バリウムの結晶の一例を示す。近接して採取された雲滴の硫酸イオン濃度が異なることが分かる。図5に得られた結晶のピクセル数分布を示す。検量線の範疇を下回っていることから、定量には至っていないが、検出下限に近い硫酸イオンを含む雲滴であることが示された。



図4 ドローン採取された雲滴による硫酸バリウム結晶生成

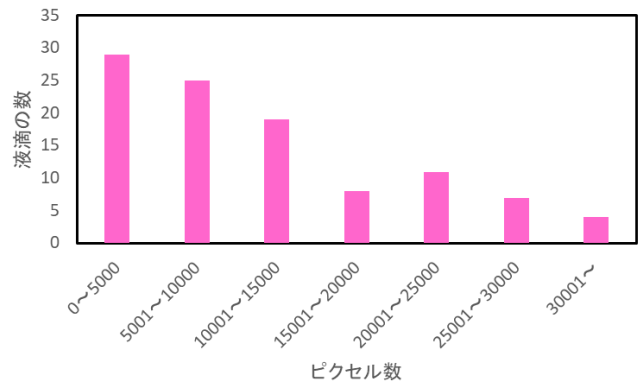


図5 ドローン採取による硫酸バリウム結晶ピクセル数分布

4. まとめ

山頂における採取では、今回トライアルということもあり、1日のみの採取期間であったが、雲滴の直接採取は十分に可能であることが示された。1回のサンプリングタイムは10分程度が最適であることも分かった。太郎坊でのドローンによる採取では、反応生成物である硫酸バリウムの結晶も確認され、地上で採取された雨粒と同様に濃度分布も確認された。この濃度分布は、雨雲を含む気塊の移流経路と紐づけられることが、われわれの雨滴解析の結果から示唆されており、粒径分布も含め更なる検討の余地は多く残されていることから、富士山頂やドローンによる採取データの更なる拡充が必要である。

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.

富士山麓太郎坊に輸送された二次粒子の生成及び成長過程に関する研究

大藪良祐¹, 五十嵐博己¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 大河内博², 皆巳幸也³

1.東京理科大学, 2.早稲田大学, 3.石川県立大学

1. はじめに

エアロゾル粒子の生成過程の中でも、二酸化硫黄(SO₂), 窒素酸化物(NO_x), 揮発性有機化合物(VOC)などの前駆気体が化学反応によって粒子化する現象を新粒子生成(New particle formation; NPF)という。NPF のメカニズムは関与する化学種の多さや段階的に進む反応のために非常に複雑で予測することが困難である。そのため、多地点での観測や理論との比較などが重要となっている。

本研究では富士山麓太郎坊(35.332° N, 138.804° E, 1290 m a.s.l.)で観測を行った。太郎坊は山岳森林地域であり、その地形の特性から山風・谷風が発生することで近隣地域からの気塊の輸送を観測することができる。エアロゾル個数粒径分布の他に大気成分及び気象要素などを用いて考察を行い、山岳森林地域の NPF メカニズムの解明を目的とした。また、過去の文献との比較を行った。

2. 方法

太郎坊における観測は2019/7/24~8/22の30日間行われた。測定要素はエアロゾル個数粒径分布、気象データ、前駆気体濃度(O₃, SO₂, NO_x, O_x)である。詳細は以下に記述する。

エアロゾル個数粒径分布については吸引した空気を拡散ドライヤーに通し相対湿度 30%未満に乾燥させた後、SMPS(粒子を分級するDMAと粒子数をカウントするCPCからなる)で測定した。測定可能粒径範囲は14.9~626.4 nm である。相対湿度は温湿度計測器により測定及び記録した。

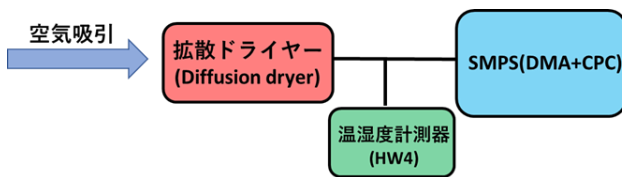


図1 エアロゾル個数粒径分布の観測システム

気象データについては平均風向(°), 平均風速(m/s), 気温(°C), 湿度(%), 気圧(hPa), 降雨強度(mm/h)を測定した。前駆気体濃度についてはオゾン濃度(ppb)を測定した。また、太郎坊周辺の地域の前駆気体濃度を環境省の大気汚染物質広域監視システム そらまめ君を基に参照した。今回は、二酸化硫黄(SO₂), 窒素酸化物(NO_x), 光化学オキシダント(O_x)の濃度を解析に用いた。

その他のパラメータとして、成長時のモード径に対して線形近似で算出する粒子成長率(Growth Rate; GR)を用いた。NPF

により生成される粒子が1nmであると仮定した場合に、GRで成長を遡ることでNPF発生時刻を推定することができる。また、前駆気体の気体分子の除去率を表すCS(Condensation Sink)も考慮した。CSは粒径と粒子数濃度に依存する値である(Kulmala et al., 2001)。

さらに、NOAAによるREADY HYSPLITを用いて後方流跡線を見ることで、太郎坊で成長している粒子を含む気塊の由来を調べた。

3. 結果・考察

今回、25 nm 以下での成長がほとんど見られなかったため、NPF イベントだけでなく、粒子成長イベントについても注目することにした。その結果、観測期間内に成長イベントは合計6日間で7回観測された。

表1 太郎坊で観測された成長イベント

NPF発生予想時刻	太郎坊での成長開始時刻	GR(nm/h)	予想成長時間	分類	CS × 10 ⁻³ (1/s) 直前30分間平均	O ₃ 濃度(ppb)
2019/7/26 8:30	9:30	28.4 ± 1.1	2h	BS型	0.06	17.6
2019/7/26 9:30	11:30	13.5 ± 0.5	3h	BS型	0.56	16.8
2019/8/3 10:30	14:00	11.5 ± 1.4	4.5h	BC型	1.81	32.7
2019/8/5 8:00	9:30	19.3 ± 0.6	3.5h	BS型	1.25	16.4
2019/8/10 9:00	11:00	11.4 ± 0.3	4h	BC型	1.75	26.8
2019/8/12 10:30	13:00	11.2 ± 0.5	4.5h	BC型	0.26	8.8
2019/8/13 9:00	9:30	28.2 ± 2.1	2h	BS型	0.36	6.4

NPF発生時刻は全て午前中と推定された。太郎坊では、山風から谷風に切り替わる際(おおよそ6-9時頃)に発生する傾向がある。谷風がNPFにより生成された新粒子と共に、成長に必要な周辺地域の前駆気体を太郎坊へ輸送している可能性が示唆された。

前駆気体との関連は7/26に顕著に見られた。

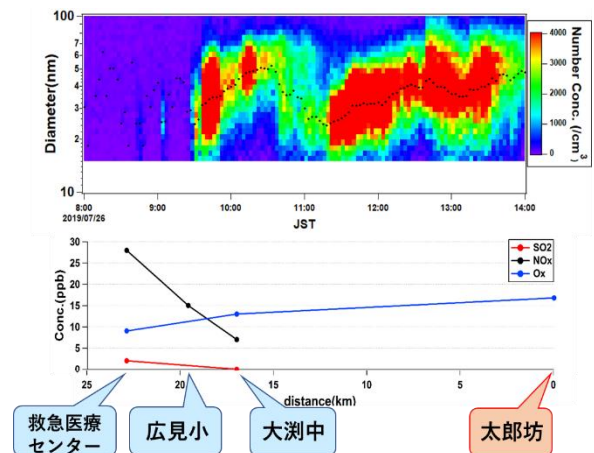


図2 気塊が通った付近の観測局の前駆気体濃度変化

気塊が太郎坊に近づくにつれて SO₂・NO_x 濃度の減少, O_x 濃度の増加が見られる。この間は粒子成長を仮定しているので、上記の前駆気体濃度変化が粒子成長に寄与していると考えられる。

また、別の日にはオゾン濃度の高さや減少量の違いによる GR の違いも見られた。

今回は GR と CS, オゾン濃度との間に相関は見られなかったため、CS に注目して考察を行った。まず、他の森林地域である YMD(長江デルタ西部 (中国)と Hyttiälä(フィンランド)との比較をした。

YMD 西部の夏期(6~8 月)の平均値 $35 \pm 25 \times 10^{-3} (s^{-1})$ に対して太郎坊の夏期(7, 8 月)の平均値は 2019 年: $1.24 \times 10^{-3} (s^{-1})$, 2018 年: $6.42 \times 10^{-3} (s^{-1})$ となり、太郎坊の CS の方が極端に低い結果となった。また、Hyttiälä との比較は以下のようになった。

表 2 太郎坊と Hyttiälä の CS 比較

地点	月	CS(event)	CS(non event)
太郎坊	7月 ^{2018年}	6.3	6.4
	7月 ^{2019年}	0.6	1.3
	8月 ^{2019年}	1.8	1.3
Hyttiälä	7月	2.5	8.1
	8月	2.2	5.9

($\times 10^{-3}$)[1/s]

Hyttiälä で報告されている CS が低いときにイベントが起こりやすい傾向は、太郎坊では一概には言えなかった。

このように、太郎坊の CS は他の地域とは傾向が異なっていたので、太郎坊内での全観測期間の CS の中央値(2019 年: $1.26 \times 10^{-3} (s^{-1})$, 2018 年: $6.42 \times 10^{-3} (s^{-1})$)と比較した。結果、9 例中 7 例が基準より低い CS の時に発生していた。残り 2 例は CS が高かったが、オゾン濃度に注目すると、全観測期間のオゾン濃度の平均値(2019 年: 21.3 ppb, 2018 年: 22.9 ppb)より高いのもこの 2 例のみとなった。

表 3 CS, オゾン濃度の基準値との比較

NPF発生予想時刻	CS $\times 10^{-3}$ (1/s) 直前30分間平均	O ₃ 濃度(ppb)
2018/7/14 7:00	2.29	17.3
2018/7/20 7:30	3.23	18.6
2019/7/26 8:30	0.06	17.6
2019/7/26 9:30	0.56	16.8
2019/8/3 10:30	1.81	32.7
2019/8/5 8:00	1.25	16.4
2019/8/10 9:00	1.75	26.8
2019/8/12 10:30	0.26	8.8
2019/8/13 9:00	0.36	6.4

青 : 低い
赤 : 高い

これにより、粒子成長には直前の低い CS 又は高いオゾン濃度が必要であるということが示唆された。

以上より、CS が低く、オゾン濃度が高い状態ならばよりイベントが発生しやすい状態であると考えられるが、そのような日は 2 日しかなく、いずれもイベントが観測されなかった。内 1 日は降雨によって粒子が洗浄されたためと考えられるが、もう 1 日については原因不明である。

4. まとめ

太郎坊での成長イベントは全 30 日の観測期間中 7 回観測された。いずれも午前中に NPF が発生したことが推定され、太郎坊まで輸送されたと考えられる。これは朝方の風向の変化に起因すると考えられる。また、SO₂, NO_x, O_x といった特定の前駆気体が成長に寄与している可能性が見られた。

GR と CS, オゾン濃度の間に相関は見られなかった。そこで CS に注目し、他の森林地域と比較した結果、太郎坊の CS の傾向は異なり、平均値が低く、さらにイベント時に CS が低くなる傾向があまり見られなかった。太郎坊内で比較した結果、粒子成長には直前の低い CS か、CS が高い場合は高いオゾン濃度が必要であることが示唆された。

謝辞

本観測は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行われた。

参考文献

- (1) M. Dal Maso et al., Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyttiälä, Finland, Boreal Env. Res., **10**, 323-336, 2005
- (2) X. M. Qi et al., Aerosol size distribution and new particle formation in the western Yangtze River Delta of China: 2 years of measurements at the SORPES station, Atmos. Chem. Phys., **15**, 12445-12464, 2015
- (3) Kulmala M., Dal maso M., Mäkelä. J. M., Pirjola L., Väkevä M., Aalto P., Miikkulainen P., Hämeri K., O'dowd C. D., On the formation, growth and composition of nucleation mode particle, Tellus (2001), 53B, 47

The Hidden Diurnal Cycles of Atmospheric Methane at the Top of Mt. Fuji

Chang-Feng Ou-Yang¹, Shungo Kato², Kojiro Shimada³, Hiroshi Okochi³, Ting-Hung Yu⁴, Neng-Huei Lin¹

1. National Central University, Taiwan, 2. Tokyo Metropolitan University, Japan,

3. Waseda University, Japan, 4. Academia Sinica, Taiwan

1. Introduction

Methane (CH₄) is the second most abundant anthropogenic greenhouse gas next to CO₂, accounting for approximately 16.5% of the global radiative forcing as reported by NOAA/GMD in 2018. According to the AR5 published by IPCC, a CH₄ has a 28 times greater global warming potential than a CO₂ over a 100-year period (GWP₁₀₀)¹. This study presents the temporal variation of atmospheric CH₄ measured at the Mt. Fuji Research Station (FRS, 35.37°N, 138.73°E, 3776 m a.m.s.l.) in the summer of 2019. The observation period of the campaign was July 12 to August 20, 2019.

2. Methods

Ambient CH₄ was measured continuously using a cavity ring-down spectrometer (G1301, Picarro, USA). The instantaneous data points were taken at a frequency of approximately 2 s and further calculated into hourly averages. A series of NOAA/GMD tertiary standards ranging from 1599 to 2024 ppb using the NOAA04 scale was served for the calibration of CH₄ prior to the campaign. Meteorological data such as wind speed (WS) are provided by the FRS.

Three-day (72 h) backward trajectories at a frequency of 1 synoptic time per day (15:00 UTC) are computed using the NOAA/ARL HYSPLIT4 model. Four groups are identified accordingly as China, Japan, Pacific, and Korea (sort in chronological order).

	Number of Days	CH ₄ (ppb)	WS (m/s)
China	3	1850.2±46.0	4.77±2.35
Japan	16	1811.4±30.3	4.03±4.11
Pacific	18	1766.4±21.7	1.55±0.21
Korea	3	1812.6±3.0	3.35±3.70
All	39	1791.5±36.0	3.34±3.21

3. Results and Discussion

The observational results are illustrated in Fig. 1. Mean concentration of CH₄ during the campaign is 1791.5±36.0 ppb, with a maximum and a minimum value of 1903.3 ppb and 1733.5

ppb, respectively. The mean values of CH₄ and WS for each trajectory group are calculated as shown in Table 1. Group China has the highest level of CH₄ (1850.2±46.0 ppb) and WS (4.77±2.35 m/s) on average, whereas group Pacific has the lowest level of CH₄ (1766.4±21.7 ppb) and WS (1.55±0.21 m/s).

As suggested in the literature², mountain-valley breezes are suppressed at Mt. Fuji due to the minimal radiation from the small surface area of the isolated mountaintop. However, a veiled diurnal cycle of CH₄ was found during a clam period (July 29 – August 8) of the campaign with lower wind speed. Reduced CH₄ in association with elevated H₂O was observed around noontime, which was likely driven by uplifting winds. The mean diurnal variation of CH₄ during the clam period is thus treated as a model for calculating the similarity for each day except the first (July 12) and the last (August 20) one. The similarity is evaluated based on Minkowski distance metric (D_{Mink}) as given as follows³:

$$D_{Mink} = \left(\sum_{t=1}^N |f_t^p - f_t^q|^r \right)^{\frac{1}{r}}$$

where f_t^p and f_t^q are the two individual time series at time t and N is the number of samples in the time series. A Chebyshev distance is defined ($r = \infty$), which is more sensitive to outlier values due to the non-linear character of the dataset. Regardless of the discrepancies between different originations of air masses, the similarity increases against daily mean wind speed with a regression coefficient (R^2) of 0.5 as illustrated in Fig. 2, meaning that the diurnal cycle of CH₄ could be more distinct when the wind speed is low.

4. Conclusion

The results of continuous measurement of atmospheric CH₄ conducted at the FRS during July 12 – August 20, 2019, was presented. A minor diurnal feature of CH₄ hidden in the time series was observed during the calm period of low wind speed, which has been analyzed by the similarity test in this study.

References

- 1) IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis, *Cambridge University Press*, Cambridge and New York.
- 2) Igarashi, Y., Sawa, Y., Yoshioka, K., Takahashi, H., Matsueda,

H., Dokiya, Y. (2006). Seasonal variations in SO₂ plume transport over Japan: Observations at the summit of Mt. Fuji from winter to summer. *Atmos. Environ.*, **40**, 7018-7033.

3) Jain, A.K., Murty, M.N., Flynn, P.J. (1999). Data clustering: A review. *ACM Comput. Surv.*, **31**, 264-323.

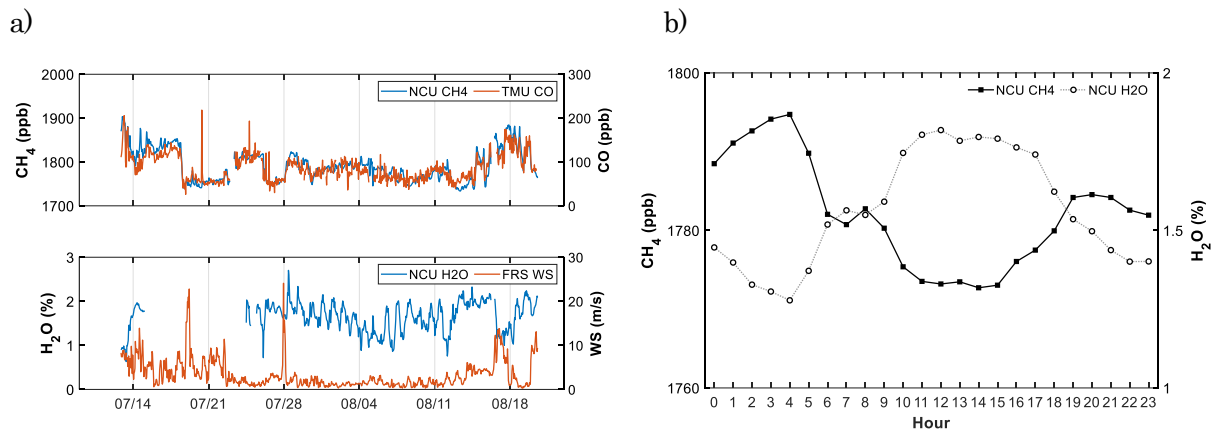


Fig. 1 a) Results of the continuous measurements during the 2019 campaign. b) Mean diurnal cycles of CH₄ and H₂O during the calm period July 29 – August 8.

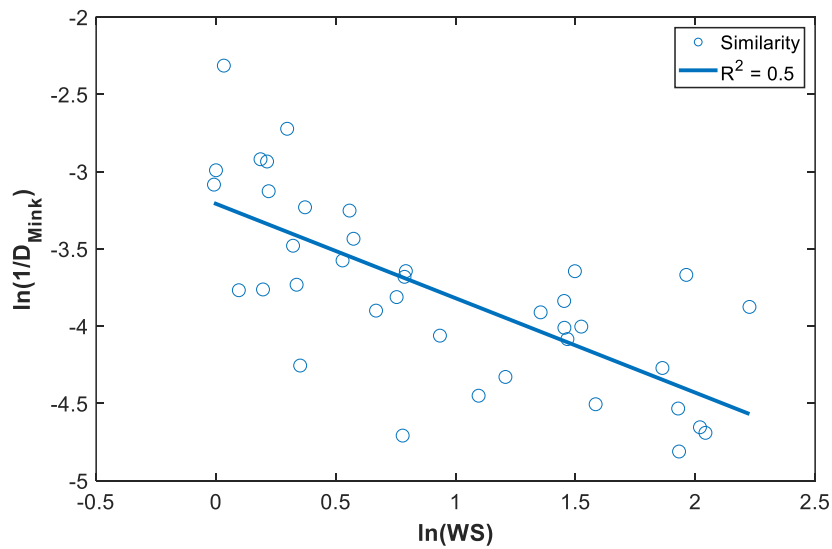


Fig. 2 Relationship between natural logarithms of similarity ($1/D_{Mink}$) and mean WS (m/s) for each day during the 2019 campaign

火山噴火予測のための富士山頂における地磁気観測:システム動作試験

長尾年恭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

富士山の最後の噴火は1707年の噴火であり300年以上も噴火がない状態になっている。近年の研究で、2011年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震後には火山噴火が発生するとも指摘されており、その観点から富士山の噴火はいつ生じてもおかしくないと考えられている。本研究では、IoT技術を用いた地磁気観測を富士山頂で行うべく、システムの動作確認を越冬にて行った。

2. 観測

富士山頂において噴火予測に資する全磁力観測を目指す。その第1段階として測定機器動作フィジビリティを測候所内で行った。データ転送はLPWA通信のSONY社ELTRESを用いた。現在、富士山には、2000年の低周波地震の発生領域周辺を中心に、東大地震研により全磁力計が1台、国土地理院により全磁力計が3台設置されている(図1)。いずれも5合目以下の標高であるためそれ以上の標高での計測はない。

った。次に、これらのデータの差分値(本研究は2分サンプリング、東大地震研では5分サンプリング)の累積度数分布を調べた。その結果、本計測では1シグマ以内が0.5 nTであり、東大の計測に比べてノイズが少ないことが確認できた(図3)。本臨時観測後、屋内にて越冬観測をはじめ、ELTRES(図3)を含めたシステムの動作確認・耐久試験をおこなっている。

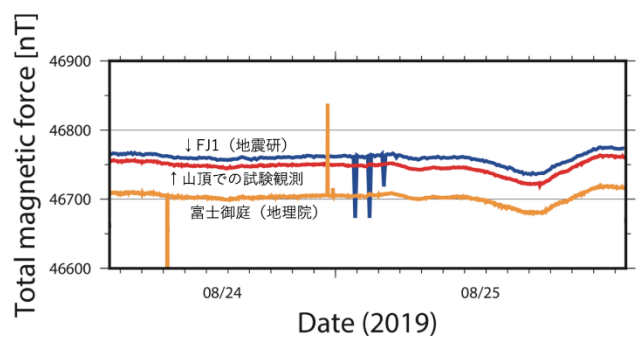


図2 東大地震研(ERI)と国土地理院と本測定。2019年8月24～25日。



図1 富士山における地磁気(全磁力)観測地点。

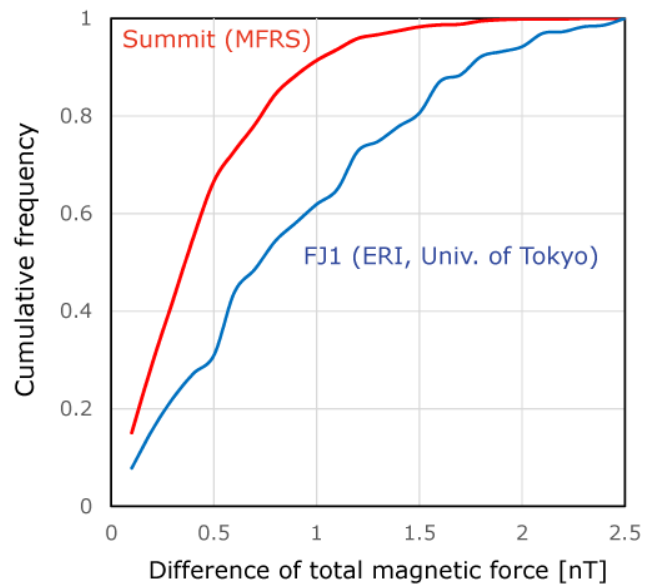


図3 差分値の累積頻度分布。

本研究ではまず屋外試験観測で全磁力測定を行い、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った(図2)。その結果、ほぼトレンドは同じであることが分か



図4 越冬中のデータ転送は SONY 社の ELTRES にて行う。

謝辞: 測定機器においてはテラテクニカ社のご支援を頂いた。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 2019-D-07)によるものである。また本成果の一部は、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)、公益財団法人ふじのくに地域・大学コンソーシアム共同研究助成「富士山火山噴火予測・減災のための観測的研究」(2019 年度)で行われた。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。

富士山頂と山麓太郎坊で観測した気柱全体エアロゾルの光学特性

新沼拓¹, 桃井裕広², 安齊真央¹, 田中賢人¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 青木一真³, 大河内博⁴, 鴨川仁⁵
1.東京理科大学, 2.千葉大学 3.富山大学 4.早稲田大学 5.静岡県立大学

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い。空間依存性を調べるためには多地点での観測が必要であり、富士山麓でもスカイラジオメータを用いた観測が行われた¹⁾⁵⁾。富士山は山頂が自由対流圏に位置しており、山麓と山頂の両地点でその場観測が行われている。本研究では、従来の両地点におけるその場観測に加えて、夏季に富士山頂および山麓でリモートセンシング装置による同時観測を実施した。

2. 観測

スカイラジオメータ(POM-02, Prede Co., Ltd.)による放射観測を富士山麓太郎坊(35.33N, 138.80E, 1290 m a.s.l.)で2019年5月2日から8月22日、富士山頂(35.21N, 138.43E, 3776 m a.s.l.)で2019年7月24日から8月21日にかけて行った。スカイラジオメータによる放射観測に加えて、2019年7月25日から8月21日にかけて山麓と山頂の両地点で光散乱式粒子計数器(OPC, KC01E, RION Co., Ltd.)と積分型ネフェロメータ(M903, Radiance Research Co., Ltd.)によるその場観測を行い、エアロゾル粒子数濃度と散乱係数を測定した。この観測ではエアロゾルの吸湿成長による粒径分布のシフトを避けるために拡散ドライヤーを用いて相対湿度を35%以下に保持している。スカイラジオメータの観測は、340, 380, 400, 500, 675, 870, 1020 nmの波長について太陽直達光強度(F)および天空輝度分布を測定している。地球に散乱体がない場合の直達光強度(F_0)を改良ラングレー法により決定し⁶⁾、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})を差し引くことで直達光強度からエアロゾルの光学的厚さ(AOT, τ):

$$\tau = \ln(F/F_0) / m_0 - \tau_{\text{Rayleigh}} - \tau_{\text{Ozone}} \quad (1)$$

を求めた。また、AOTの波長依存性;

$$\ln(\tau) = -\alpha \times \ln(\lambda) + \beta \quad (2)$$

からオングストローム指数(α)を算出した。オングストローム指数は値が大きいほど微小粒子が卓越し、小さいほど粗大粒子が卓越することを表している。また天空輝度を用いて逆問題を解くことで、エアロゾルの複素屈折率、粒径分布を決定した。本研究では直達光強度の解析にはDSRAD⁷⁾を、天空輝度を用いた逆問題の解析にはSKYRAD.pack version 4.2⁸⁾を用いた。

3. 結果・考察

3.1. 太郎坊観測

太郎坊における光学的厚さを図1に示す。日ごとに全データの平均値と標準偏差を表している。全解析日の平均値は光学的厚さが0.14、オングストローム指数が1.10となった。山頂との同時観測期間中の解析日は8月4日のみで、気柱積算粒径分布は図2のようになった。図の値は日ごとの平均を示している。0.1~0.2 μm に微小モードのピーク、1 μm 以上に粗大粒子のピークが現れる二山型の分布を示す日が多く観測された。

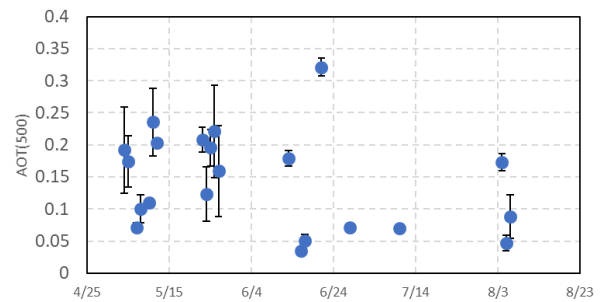


図1：富士山麓太郎坊における光学的厚さ (2019)。

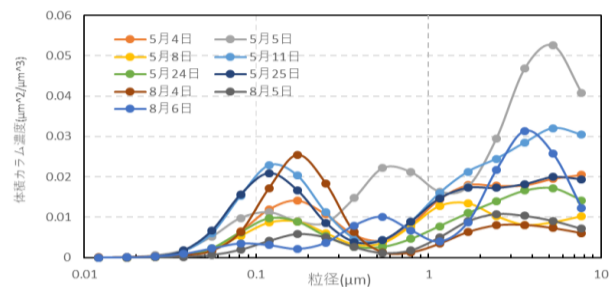


図2：富士山麓太郎坊における気柱積算粒径分布 (2019)

3. 2. 山頂観測

山頂における光学的厚さを図 2 に示す。日ごとに全データの平均値と標準偏差を表している。全解析日の平均値は光学的厚さが 0.03 オングストローム指数が 1.43 となった。大気の薄さから SKYRAD.pack version 4.2 で現実大気を再現することはできず、気柱積算粒径分布が得られなかった。しかし、改良が進むことで再現できる可能性がある⁹⁾。

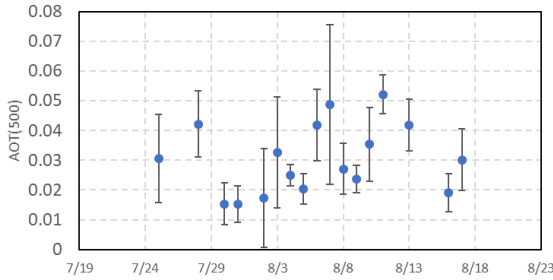


図 3：富士山頂における光学的厚さ（2019）。

3. 3. 太郎坊および山頂における同時観測

8月4日の10時49分から14時02分に太郎坊・山頂での同時観測が行えた。両地点での光学的厚さの比較を図 4 に示す。ここでは F_0 季節変化やの改良ラングレー法における標準偏差⁹⁾を考慮して、 $\ln(F_0)$ に ± 0.03 の誤差があると仮定して $\pm 0.03/m$ を AOT の誤差範囲としている。図 4 から太郎坊上空のエアロゾルの大部分が太郎坊・山頂間にある様子が確認できた。同時刻における散乱係数は図 5 のようになった。オングストローム指数の比較結果を図 6 に示す。山頂観測でオングストローム指数がより高くなり、この結果から高高度では粗大粒子の割合が減る傾向があることが示唆された。ただし、大気の薄い山頂観測でのオングストローム指数の算出では誤差が非常に大きくなるとの指摘がある。今後、各データごとの推定誤差の計算を行うとともに、OPC により得られた粒径分布から Junge 指数を算出しオングストローム指数への変換することでスカイラジオメータで得られる値との比較を行い山頂における粒径分布を推察する。

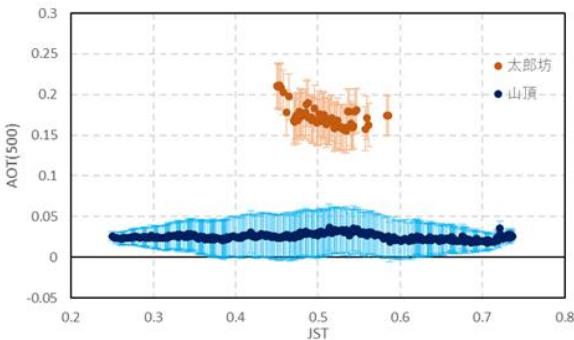


図 4：光学的厚さの比較(2019/8/4)

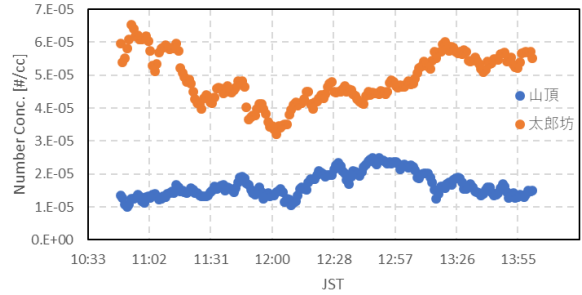


図 5：散乱係数の比較(2019/8/4)

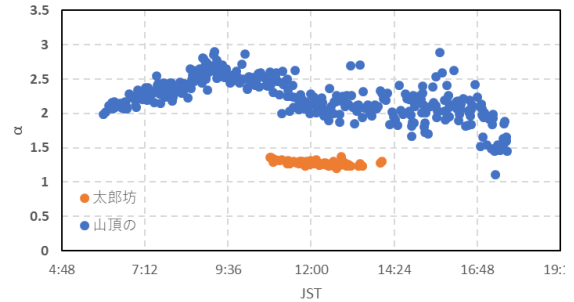


図 6：オングストローム指数の比較(2019/8/4)

4. おわりに

本研究では初めてスカイラジオメータを富士山頂に設置し、山麓太郎坊と両地点での観測を行った。解析期間中(太郎:2019/5/2~8/22, 山頂:2019/7/24~8/21)の光学的厚さの平均は太郎坊で 0.14 山頂で 0.03 となった。8月4日には同時観測を行うことができ、両地点における光学的厚さの比較を行うことができた。解析プログラムの改良と両地点での観測の継続により、エアロゾルの鉛直分布の解明が進むことが期待できる。

謝辞

本研究の一部は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれた。また、本研究の一部は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」の学生公募(S02, 2019 年度)の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 中原ら (2014). 第 7 回成果報告会講演予稿集, 36-37.
- 2) 中原ら (2015). 第 8 回成果報告会講演予稿集, 35-36.
- 3) 橋口ら (2016). 第 9 回成果報告会講演予稿集, 50-51.
- 4) 桃井ら (2017). 第 10 回成果報告会講演予稿集, 51-52.
- 5) 桃井ら (2018). 第 11 回成果報告会講演予稿集
- 6) 桃井ら (2020). 第 13 回成果報告会講演予稿集.
- 7) Momoi et al. (2019). AMTD, in review.
- 8) Nakajima et al. (1996). Appl. Opt., 35, 2672-268

急性低圧低酸素曝露が覚醒時および睡眠時の 生理心理的指標に及ぼす影響とその順化

林聡太郎¹, 平野晋吾¹, 澤田結基², 野瀬由佳¹, 山口正寛²,
1.福山市立大学, 2.安田女子大学

1. はじめに

高地や低酸素環境における睡眠の研究は様々な制約からまだ少ないが, 脳波計の小型化・高精度化により, 登山時における睡眠の客観的評価も可能になってきている. Selvamurthy ら(1986)は, 順化する前の参加者は高地(3,500m)において深い睡眠が減少し, 微小覚醒が増加する現象を示しているが, 登山後の高地における睡眠が, その一般的な役割である心身の疲労の回復や低酸素環境への順応にどのような役割を果たすのかという点については研究もほとんどなく, 十分議論されていない. 山頂滞在を伴う富士山登山を実施し, 2日間の山頂滞在を行うことは, これまで明らかにされていない, フィールドでの低圧低酸素環境での回復過程・順応過程における心身の反応の解明に繋げることができると考えられる. これらは, 脳波に関わる新たな知見を得られると共に, 登山時および山頂滞在時の健康管理など, 基礎研究と臨床研究の両面の立場からアプローチすることによって, 安全な登山活動に寄与することができる.

本研究は, 本邦最高峰への登山活動時の運動強度および心理的变化を計測するとともに, 低圧低酸素環境への2日間の安静滞在が, ヒトの覚醒時および睡眠時の反応に及ぼす影響を, 生理学的・心理学的指標の関連性から明らかにすることを目的とした.

2. 方法

被験者は, 運動習慣を有するが, 高所順化をしていない男子学生7名(21±1歳, 170±7cm, 66±8kg)とした. すべての被験者には事前にインフォームドコンセントを取り, 同意を得た. また本研究は福山市立大学研究倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号:2019006). 登山時の被験者の荷重は体重の20%未満とした. 生体負担を測る生理的指標には, 心拍数(HR), 血圧(BP), 動脈血酸素飽和度(SpO₂), 主観的運動強度(RPE), 唾液アミラーゼ(Amy), 鼓膜温(Ttym)を採用した. また, 低値および山頂滞在中の睡眠時の睡眠ポリグラフの測定を行なった. 睡眠ポリグラフは, 脳波基礎律動(α波, β波, θ波, δ波)の解析によって, ストレスや眠気を反映する覚醒水準の推定及び, 睡眠の質を反映する睡眠変数の算出を行った.

登山活動1ヶ月前までに低地安静時のすべての測定を行

い, 登山前日は測定者1名と実験機材等をブルドーザーによって山頂まで揚げ, 実験準備を整えた. 登山当日は, 測定者3名, 記録者2名および被験者7名で朝7時から富士宮口5合目より徒歩登山を開始した. 登山活動は, 富士山頂の富士山測候所まで富士登山の熟練者の指示のもと, 45~60分ごとに15分程度の休憩を取りながら行なった. 休憩の間に各生理的指標, 主観的温度感覚(TS)と環境測定として気温, 湿度, WBGT, 気圧および高度を測定した. 山頂では, 富士山測候所に約48時間の滞在し, 3時間毎に1回の各生理的指標および環境測定を実施した. また睡眠時には睡眠ポリグラフの測定を行なった. 山頂滞在をしていた測定者, 記録者および被験者全てが徒歩下山した.

3. 結果及び考察

急性高山病の症状を呈し, 実験を継続が困難となった者を中途下山させたことによって, 富士登山を完遂した者は, 測定者1名, 記録者2名および被験者4名であった. 測候所滞在2日目は, 初日に下山した測定者2名が再度徒歩登山を実施した. そのうち1名は測候所滞在し, 他方は山頂での実験継続が困難と判断された被験者2名と記録者1名を下山させた. 3日間で実験を完遂した者は2名であった. 高度に依存し, 気圧, 気温, 湿度およびWBGTは低値を示した. 図1に登山活動中のHRおよびRPEを示した. HRは, 安静時に比して有意に高値を示したものの, 約7時間の登山活動中に有意な変動はなかった. RPEは登山活動による筋疲労によって時間経過とともに高値を示した. 図2に登山活動中のSpO₂の変化を示した. 高度が上がると酸素分圧が低下することから, 高所ではSpO₂は低下し, 山頂では80.7±6.8%であった. 登山活動中は, SpO₂が急性高山病の発症を推測する客観的指標となり得るが, SpO₂の急激な低下も見られたことから, 安全な登山にはSpO₂の把握と頭痛や吐き気などの自覚症状の有無を確認することの重要性が考えられた. 実験を完遂した者は事前の高所順化をしていなかったことから, エリスロポエチン遺伝子多型であることが考えられる. 中途脱落者は, 登山活動時におけるエネルギー摂取量が少なく, 飲水量も登頂者に比して少なかった. これらは高度の上昇と運動強度の増大が末梢性疲労を引き起こし, 惹いては中枢性疲労にも影響を及ぼした可能性が考えられた. また, 高度に伴う気温低下からTSも有意

に低下し、強い寒さを感じていたが、登山活動中の T_{tym} は大きな変動はなかった(図 3)。これらは行動性体温調節が適切に行われていたことが示唆される。Amy は、日内変動の影響も考えられるが、被験者間のばらつきが大きく、有意な差は観察されなかった。測候所滞在では、HR, SBP および Amy は先行研究と同様の日内変動を示したが、 T_{tym} においては一般的なサーカディアンリズムとは真逆の位相を示した(図 4)。また、図 5 に低地および測候所滞在における睡眠時ポリグラフを示した。山頂において2夜の PSG を記録した 1 事例について、睡眠構造の分析を行った結果、基準夜と比較して山頂第 1 夜は①徐波睡眠の減少、② REM 睡眠の減少、③微小覚醒の微増、④軽睡眠の増加がみられ、①③は先行研究を支持する結果であった。また、第 2 夜は第 1 夜よりも①徐波睡眠の増加、② REM 睡眠の減少、③微小覚醒の増加が示された。

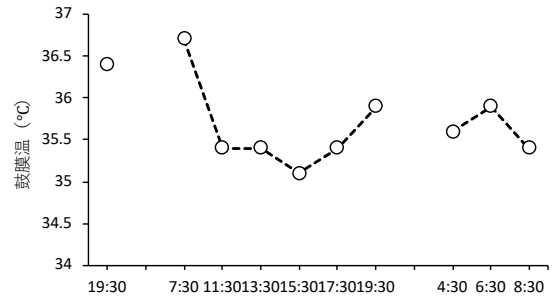


図 4 富士山測候所滞在時の鼓膜温の変化

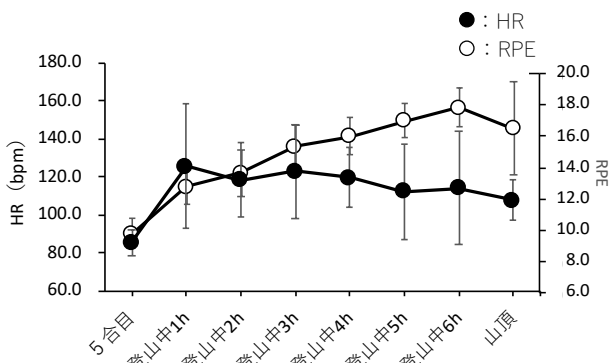


図 1 登山活動中における HR, RPE の変化

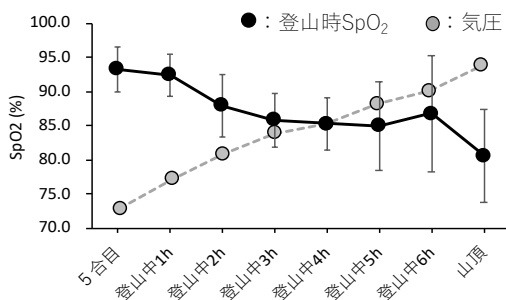


図 2 登山活動中における SpO₂ の変化

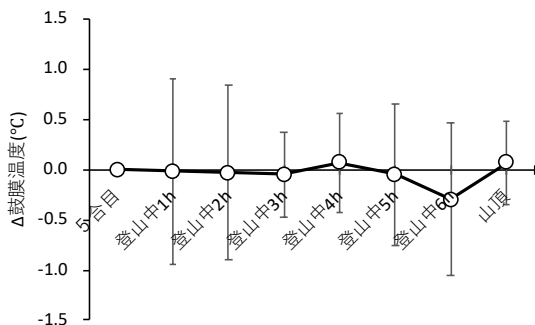


図 3 登山活動中における Δ鼓膜温の変化

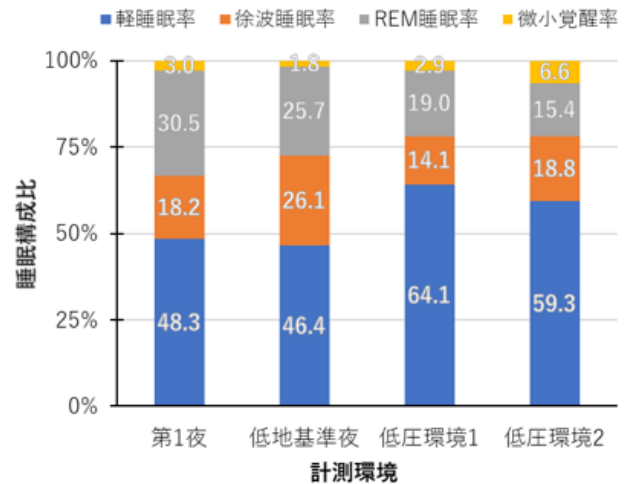


図 5 睡眠時の睡眠ポリグラフの比較

4. おわりに

本実験では、脱落者が多く実験の完遂ができた被験者は1名のみであったことから、測候所滞在時における各生理的指標における急性適応や順化は明らかになっていないことは本研究の限界である。しかしながら、睡眠時ポリグラフについては、事前の低地での測定を行い、測候所滞在時においても2夜連続での測定を行うことができた。詳細は解析中である。

ジャンピングシーラスの撮影と平均的な形態

岩崎杉紀¹, 瀬口貴文¹, 山口智子¹, 鴨川仁²

1.防衛大学校, 2 静岡県立大学

1. はじめに

ジャンピングシーラス(JC)は、積乱雲の頂上から雲が上方に 1-2 km 飛び上がる現象である。積乱雲は断熱過程で発達するため、積乱雲自身が直接的に成層圏を加湿することはないと考えられている。しかし、積乱雲から派生する JC がジャンプ後に漂い昇華することによって成層圏を加湿する可能性が Seguchi et al.¹⁾ によって報告された。この論文では、2016 年に旧富士山測候所と防衛大学校(神奈川県横須賀市)に設置したカメラで 15 秒ごとに撮影した JC と恒星の写真より、JC のジャンプ高や幾何学的特徴を報告した。JC の形態が定量的に報告されたのは、この論文が世界初である。

2019 年は、旧富士山測候所、防衛大学校、つくば市に設置したカメラによる JC 撮影を行った。ただし、撮影対象は通常の JC ではなく、スーパーセル型の極度に発達した積乱雲や全体的に風向風速が一定な(鉛直シアがない)条件で発生した積乱雲とした。通常の積乱雲はその内部で上昇気流と下降気流が同じ場所で起き、それらの気流が打ち消しあうため寿命が 30 分程度と短い。ただし、積乱雲が次々と同一地点に発生すると、あたかも寿命が長く感じることもある。一

方、スーパーセル型の積乱雲はその内部で上昇気流と下降気流が分かれているため、強く発達しやすく寿命が数時間と長い。竜巻も発生しやすい。通常の積乱雲と比べ、スーパーセル型の積乱雲では JC は多頻度で出現し大規模になるかもしれない。しかしスーパーセル型の積乱雲は日本で発生することは稀なため、撮影はかなり難しいことが予想される。

また、2017 年と 2018 年の JC 撮影の解析も行った。2019 年度の解析はまだ終わっていないので、これは軽く触れるにとどめ、本予稿では 2016 年から 2018 年の JC 撮影で言えたことを主に述べる。この 3 年間の結果は、Seguchi²⁾ にまとめられている。

2. 2019 年度の観測

2019 年度では、防衛大学校とつくば市に設置した JC 撮影は、15 秒おきに行った。これ以上時間が空くと JC の発達過程を追いつらなくなり、それより短いとデータ量が大きくなり記憶媒体やクラウドサービスへのデータ転送が難しくなるためである。電子シャッター搭載したカメラを用いた。この頻度

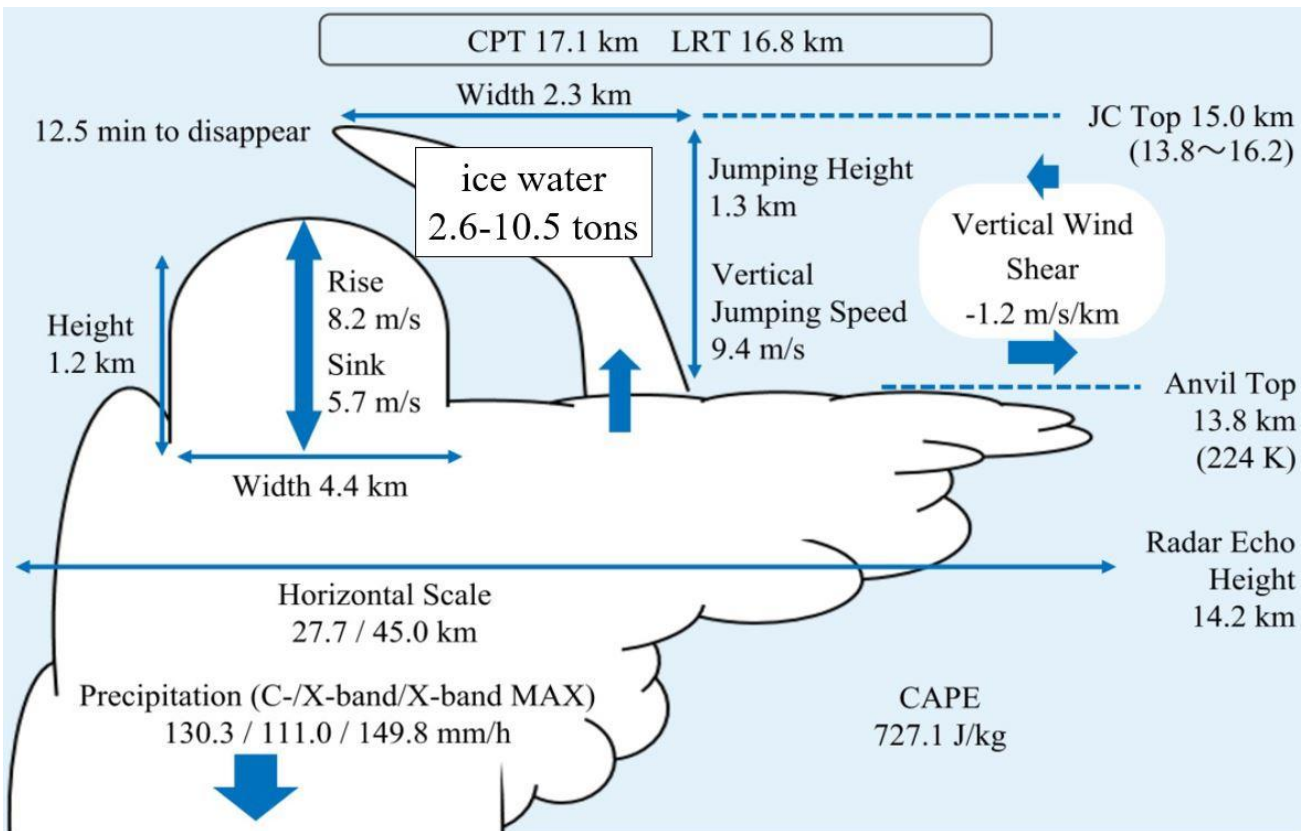


図 28 個の JC の観測事例の各パラメータの平均値。Seguchi²⁾ に加筆。

で撮影すると1か月あたり17万回の撮影となり、機械式シャッターが1か月程度で故障するためである。また、どちらのカメラも感度良くするためモノクロである。ただし、台風19号の暴風によってつくば市に設置したカメラ制御と記録用のノートパソコンとハードディスクが浸水し、すべてのデータが消えてしまった。

旧富士山測候所では、写真ではなく動画撮影を行った。これはカラーであるためモノクロに比べ雲の判別はしやすく、動画であるのでタイムラプス動画に比べ時間変化は分かりやすい。ただし、画素数の粗さや星撮影ができないためJCの規模の把握などには向かない。定性的な現象の把握に向いている。

3. 2016年から2018年のデータ解析

解析方法は、Seguchi et al. (2019)にならい、恒星によって写真の各ピクセルの方角を求める。精度検証は、標高100 mの防衛大学校で撮影した富士山の写真を用いた。富士山山頂と防衛大学校は直線距離で70 km離れている。距離と写真から求めた角度から、富士山の高度は3.77 kmとなった。JC解析には十分な精度である。

2016年から2018年の3年間の夏季観測で、JCは28個観測できた。内訳は2016年が14個、2017年が3個、2018年が11個である。2017年が3個と少ないのは、8月の東京では21日連続した降雨を記録するといった天候不良のため、カメラと積乱雲の間に多くの雲が存在し、視界が遮られJC撮影の機会がほとんどなかったためである。JC撮影は、視界が遮られないよう、カメラ付近は晴天で、カメラから100 km以上離れた地域に積乱雲が出ているといった異なる気象場であることが望ましい。

図は、28個のJCのジャンプ高やジャンプ幅といった各パラメタの平均値である。ただし、注意したいのは、積乱雲のカメラ側の端から10 km以内にJCが発生しないとカメラでとらえることは難しいことである。これは、カメラがJCを見上げているため、積乱雲の雲頂をすべて見渡すことができないためである。したがって、このデータには台風といった大規模な降水システムの積乱雲のJCは含まれていない。

写真からは、単位体積当たりに含まれる雲粒の氷の量(ice water content, IWC)やJCが消滅した後の水蒸気量を求

めることができない。カメラとJCの間の大気に含まれる水蒸気量やエアロゾルの量が推定できないためである。一方、Iwasaki³⁾の衛星搭載ライダーCALIOPと雲レーダCloudSatの同期観測の2つの事例解析により、積乱雲上部の成層圏に広がる雲のIWC(0.2–0.8 mg/m³)が推定されている。このIWCとJCの平均体積の積によって1個当たりのJCに含まれる氷の量を2.6から10.5 tと推定した。

4. おわりに

JCの地上カメラによる連続撮影によって、1個当たりのJCに含まれる氷の量が2.6から10 tと推定できた。いままでJCの平均的な形さえ分からなかったため、JC研究の大きな進展と言える。今後の課題は以下の3つ考えられる。1つ目は積乱雲から平均何個のJCが発生するのか導出し、積乱雲による成層圏の加湿量を推定することである。これは気候研究に重要な量である。2つ目は、スーパーセル型の積乱雲のJCの特徴が本研究で求めたものと異なるのか否かである。最後に、積乱雲上部に広がるabove anvil cirrus plume(AACP)と呼ばれる絹雲の撮影である。これはかなとこ雲の上部に煙のようにたなびいている雲で、衛星で確認できるくらい(100 kmスケール)で存在している。しかし、AACPがどのように発生しているか未解明である。JCの連続発生によって発生するのか、それとは全く異なる機構で発生するのか、分からない。今後は、これらを研究できるようカメラ撮影方法を工夫する必要がある。

参考文献

- 1) Seguchi, T., S. Iwasaki, M. Kamogawa, T. Ushiyama, and H. Okamoto, 2019: Observation of jumping cirrus with ground-based cameras, radiosonde, and Himawari-8. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-033>.
- 2) Seguchi, T., 2020: The Analyses of Jumping Cirrus with Ground-based Observations, Diss. National Defense Academy, Japan.
- 3) Iwasaki, S., Z. J. Luo, H. Kubota, T. Shibata, H. Okamoto, and H. Ishimoto, 2015: Characteristics of cirrus clouds in the tropical lower stratosphere, *Atmospheric Research*. 164–165, 358–368, doi:10.1016/j.atmosres.2015.06.009.

富士山頂における粒子濃度増加イベントの観測

井波真哉¹, 東秀憲¹, 猪股弥生¹, 瀬戸章文¹, 大谷吉生¹, 森樹大², 三浦和彦², 加藤俊吾³

¹金沢大学, ²東京理科大学, ³首都大学東京

1. はじめに

富士山は標高 3776 m の孤立峰であるため、地表付近(あるいは大気境界層)の影響が少なく、自由対流圏における粒子濃度や東アジアから輸送された越境大気汚染物質を測定するのに適している。大気中におけるナノ粒子の生成や成長は新粒子生成と呼ばれており、大気中微小粒子濃度の増加は太陽光の散乱強度を変えるため、地球の放射収支への影響を与えるものと考えられている。

これまでに富士山頂で実施された観測では、新粒子生成が頻繁に観測されているが¹、新粒子生成過程を明らかにするためには、より小さい粒子径からの測定が必要である。そこで、本研究室では、2016 年より微分型静電分級器(DMA: Model 3085, TSI Co. Ltd.)と凝縮核計数器(CPC: Model 3776, TSI Co. Ltd.)を組み合わせた走査式移動度計測装置(Nano-SMPS: 図 1 左)を用いて、粒子径 2.09~63.8 nm までの粒子個数濃度を計測している²。また、今年度は、ナノサンプラー II (KANOMAX Model 3182: 図 1 右)を用いて大気中の微粒子を各粒子径範囲ごとにフィルター捕集し、イオンクロマトグラフィーにより微粒子の化学成分分析を行った。



図1 観測機器 (左: Nano-SMPS, 右: ナノサンプラー)

2. 方法

観測は2019年7月10日から8月21日まで、富士山特別地域気象観測所(35.36°N, 138.72°N)で行った。大気試料は 15 L/min で吸入し、ディフュージョンドライヤーにより乾燥させた後、DMAで粒子を分級し、CPCで個数濃度を検出した。ナノサンプラーについてはポンプ流量を 40 L/min に設定し、半日の短期サンプリングあるいは約 2 週間の長期サンプリングを行った。回収後のフィルターは超純水で超音波抽出し、その溶液をろ過してイオンクロマトグラフィーにより水溶性イオンの化学成分分析を行った。

3. 測定結果ならびに考察

3.1 粒子径分布

図 2 に 2019 年の Nano-SMPS で測定したナノ粒子の粒子径分布の時間変動を示す。縦軸に粒子径、横軸に日にち、粒子個数濃度を色分けで示している。白色で示されている部分は雷等の機材トラブルにより観測できなかった期間である。赤い筋状部分に粒子個数濃度が高くなるイベントが観測されており、2019 年は 23 回観測された。

3.2 粒子濃度増加イベントの分類

次に粒子濃度増加イベントを発生した時間と空気塊の由来について分類した。まず、イベントの発生した時間帯を 6:00~18:00 を日中、18:00~6:00 を夜間と分類した。さらに、これらのイベントの空気塊の輸送経路を調べるために、NOAA の HYSPLIT モデルを用いて 72 時間後方流跡線解析を行い、空気塊を大陸由来、海洋由来に分類した。2019 年は過去 3 年間と比較すると夜間に始まる粒子濃度増加イベントが多く観測され、またアジア大陸上空由来よりも海洋由来が多かったという特徴がみられた。

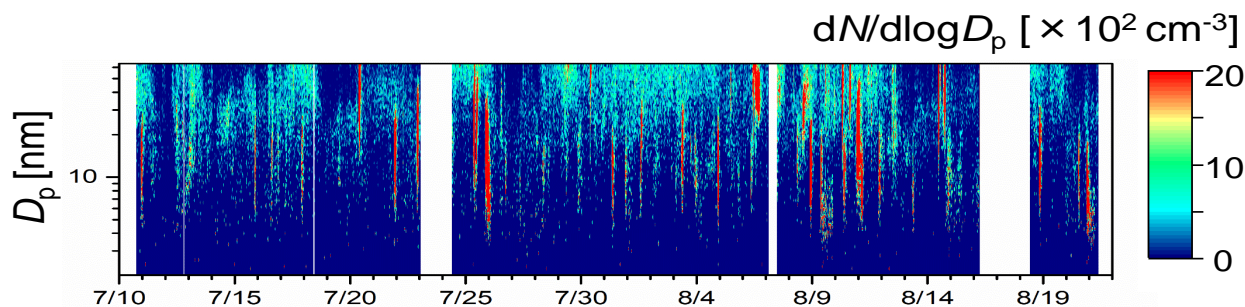


図2 粒子個数濃度のカウンタープロット (2019年)

3.3 粒子濃度増加イベントと粒子起源

Nano-SMPS のデータより粒子成長速度を計算し、核生成位置の推定を行い、気象パラメータ等粒子起源の検討を行った。図3に夜間に観測された粒子濃度増加イベントの一例(2019年8月18日)の各パラメータの変化を示す。粒子濃度増加イベントが起こる1時間程前に二酸化窒素を中心に窒素酸化物のガス濃度の上昇がみられ、これらが粒子起源の可能性はある。一方で空気塊の時間と標高の関係から、この空気塊は山頂よりも下方の層を経由しており、夜間でも大気境界層の影響を受けている可能性がある。

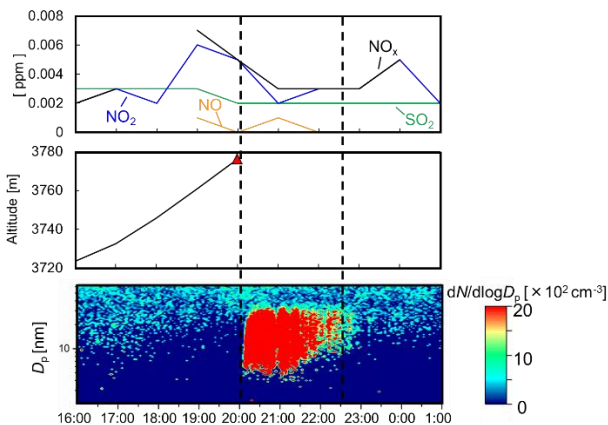


図3 粒子濃度増加イベント時と各パラメータ変化(上:富士山麓のガス濃度, 中:空気塊の標高, 下:粒子濃度変化)

3.4 イオンクロマトグラフによる水溶性イオンの分析

表1, 2に短期サンプリングにおけるナノサンプラーのポンプ稼働時間を示す。図4に粒子径範囲ごとの水溶性イオンの成分濃度の結果を示す。比較的大粒径側に硝酸イオン, 小粒径側に硫酸イオンがみられた。これは、硝酸イオンの蒸気圧が硫酸イオンよりも高いため、粒子化が起こりにくく、硝酸イオンが既存粒子に吸着したことやSO₂ガスの硫酸塩粒子の生成が支配的であったからであると考えられる。

表1 ナノサンプラーポンプ稼働時間(半日)

	Start	Stop	Pump operating time [min]
(a)	7/10 18:00	7/11 6:00	720
(b)	7/24 18:17	7/25 6:00	703
(c)	7/24 10:23	7/24 18:00	457

表2 ナノサンプラーポンプ稼働時間(長期)

	Start	Stop	Pump operating time [min]
(d)	7/11 6:30	7/24 10:00	18450
(e)	7/25 6:18	8/6 10:03	17505
(f)	8/6 10:27	8/21 9:45	21558

また、図5に粒子径範囲ごとのイオン当量濃度(nss-SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻)の存在比を示す。半日サンプリングにおいて粒

子径が0.5 μmから1.0 μmの捕集された粒子についてアンモニウムイオンと非海塩性硫酸イオンが1:2の割合で存在しており、硫酸水素アンモニウム(NH₄HSO₄)の形態の粒子が捕集されたと考えられる。また粒子径0.5 μmから1.0 μmの粒子を除く0.1 μm以上の粒子について1:1のライン上付近に分布しており、硝酸アンモニウム(NH₄NO₃)の形態の粒子が捕集されたと考えられる。また長期サンプリングにおいてほとんどの粒子径範囲の粒子でアンモニウムイオンと非海塩性硫酸イオンが1:1のライン付近に存在しており、平均的に硫酸アンモニウム((NH₄)₂SO₄)の粒子が多く存在していたと考えられる。

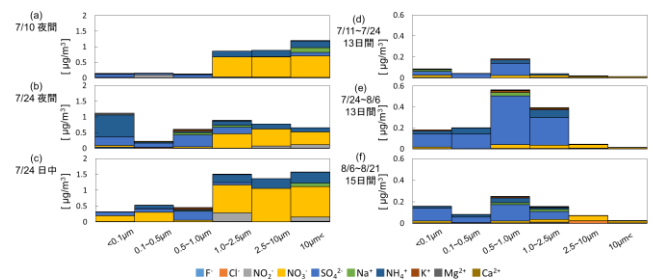


図4 粒子径範囲ごとの水溶性イオン成分濃度

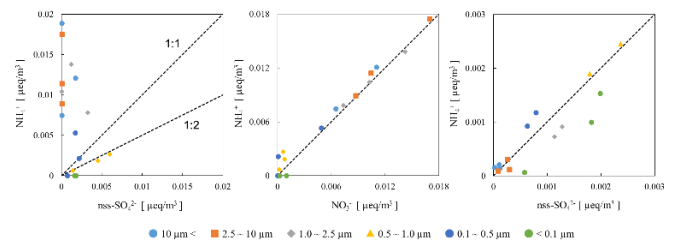


図5 粒子径範囲ごとのイオン当量濃度存在比 (左, 中:半日サンプリング, 右:長期サンプリング)

4. おわりに

2019年のイベントは日中夜間ともに観測され、海洋由来のものが多かった。また2018年度同様、10 nm前後の粒子径から始まるものが多く、富士山頂とは別の場所で核生成し、ある程度成長した粒子が山頂にて観測できていたと考えられる。核生成位置を推定し、核生成位置付近のガス濃度上昇との相関が得られた。

ナノサンプラーにより捕集した微小粒子の水溶性イオンの化学分析について、イオン当量濃度で分布を検討し、良好な相関が得られた。特に粒子径1.0 μm以上の粒子では同様の化学組成の形態で存在していることが示唆された。

参考文献

- 五十嵐ら, 富士山頂における新粒子生成の経年変化. 第11回成果報告会公演予稿集, 40-41 (2018)
- 村本ら, 富士山頂におけるナノ粒子の粒子径分布計測. 第11回成果報告会公演予稿集, 34-35 (2018)

2019年高高度放電発光現象および広域雷活動研究

鈴木智幸¹, 鴨川仁², 長尾年恭³

1. 東京学芸大学, 2. 静岡県立大学, 東海大学

1. はじめに

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の研究では、活発な雷放電に伴って、夏季の関東平野上空で発生するスプライト等の高高度放電発光現象(雷雲の上空で発生する放電現象)を観測し、微細構造や発生の仕組みについて解明するとともに、特に低高度の地上観測では、上空を覆う雲や地球の曲率の撮影で遠方からの観測が難しい巨大ジェット、ブルージェット、ブルースターターを詳細かつ多数観測することを試みた。また、富士山頂という高高度を利用した広域雷放電位置標定を行うために、雷放電波形の観測機材を設置し、試験観測を実施するとともに、通年観測の可能性を確認した。今回は、将来的に、これらの観測データと気象データを組み合わせて、気象、雷活動及び高高度放電発光現象との関係を明らかにすることを目的としている。

2. 観測結果

従来から行っている WATEC 社のモノクロカメラ(モノクロ VGA・640x480ピクセル)を2方向(視野中心北北東及び北東)に向け、それぞれのレンズも広域撮影(4mm)になるように設定した。測候所から北部(東北地方・関東北部)から東部(千葉県沖など)の観測領域をカバーした。さらに、今年から高性能一眼レフカメラである SONY 社アルファセブンによるカラーHDTV(1280x960ピクセル)自動撮影システムを構築し、昼夜の撮影を試みた(図1)。7月は天候が不順であったが、8月からは天気の良い日も増え、安定した観測ができるようになった。この間、北関東で発生した、活発な雷活動が記録(図2)できていることから、その機能が確認できた。特に雷雲からリーダーが伸び、リターンストローク

により雲全体が発光し、その後雲内の電荷が中和されると雲全体の発光が弱まる一連の放電発光が鮮明に撮影できた。今年度は、高高度発光現象と見られるものは記録できなかったが、多数の雷放電の撮影が滞りなく行うことができた。また、かねてから使用しているモノクロカメラによって高高度発光現象も観測された(図3)。

また、雷放電位置標定装置(全世界落雷標定ネットワーク Blitzortung の機器)を富士山頂および御殿場に設置して通年で観測を行った。富士山頂に機器を設置することで、その高い標高のため広域雷放電位置標定観測が可能となり、また、高い検知率で雷活動を遠方まで検知できるものと期待された。富士山山頂における通年観測における冬季(9月~6月)では、バッテリーと太陽光パネルによって電気の供給を行い、これによりWiFiルーターと雷放電位置評標定装置を稼働させるシステムを目指している。本年度は、次の試験動作を行った。まず8月25日から試験運用を開始し、8月29日のバッテリー切れまでの間、観測を行った。本システムは夜間にバッテリーインジケータ1目盛り、すなわち25%の電源容量が消費されるため、太陽光パネルによる充電がない場合、2日程度の稼働時間となった。今回の観測では、富士山山頂で10日程度連続して天気が悪いことがあったことから、少なくとも10日程度は充電なしに稼働できるだけのバッテリーを準備することが必要である。

3. まとめ

今回の観測では、これまでの機材に加えて、カラーHDTVカメラ自動撮影システムを構築して設置し、雷雲や雷放電の観測が可能であることを確認するとともに、全世界落雷標定ネットワーク Blitzortung のセンサー機器を山頂



図1 アルファセブンによる自動観測システム。左は前景、右は後景(正面は白山岳)



図2 アルファセブンで撮影された雷放電の時間発展. 2019年8月2日20時15分頃の画像.



図3 2019年8月8日に観測された高高度放電発光現象(スプライト).

に設置して試験観測を実施した結果、山頂から Blitzortung サーバーに WiFi 経由で送信されたデータを使った標定がなされたことが確認できた(図4)。さらに、通年観測に必要な各種情報が得られた。

謝辞: カラーHDTV自動撮影システムは2015年放送文化基金助成「富士山山頂で行う雷放電・高高度放電発光現

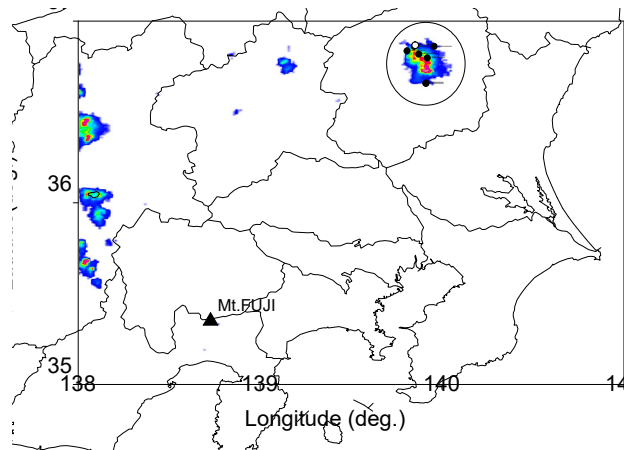


図4 全世界落雷標定ネットワーク Blitzortung で取得された2019年8月日20時15分からの5分間の雷活動. 円内が図2に対応する雷雲のエコーと雷放電活動(白丸).

象の観測と映像データベース構築」によって開発されたものである。また本成果の一部は、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。

富士山頂・太郎坊で捕集したエアロゾル粒子の個別分析

牧野脩哉¹, 市毛友彬¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 足立光司²

1. 東京理科大学, 2. 気象研究所

1. はじめに

大気中のエアロゾル粒子は、太陽光を散乱・吸収する直接効果と、雲凝結核となって雲の放射特性や寿命を変化させる間接効果を持ち、地球の放射収支に影響を及ぼす。しかしながら、粒子個々の化学組成や形状、混合状態を調べることは、地球規模でのエアロゾル粒子の気候影響を理解する上で重要である。特に、粒子の形状は気象条件や組成により変化し、それに伴い粒子の特性が変化することが報告されている¹⁾。

本研究では、夏季富士山頂(海拔 3776 m)と富士山麓の太郎坊(海拔 1290 m)で捕集したエアロゾル粒子に対し、透過型電子顕微鏡を用いて粒子個々の組成や形態を調べた。

2. 手法

エアロゾル粒子は炭素補強されたコロジオン膜上に捕集した。粒子の捕集には、山頂では2段式インパクター(50%カットオフ径:粗大ステージ;1.0 μm, 微小ステージ;0.25 μm)を、太郎坊では3段式インパクター(50%カットオフ径:粗大粒子除去用;4.0 μm, 粗大ステージ;1.0 μm, 微小ステージ;0.25 μm)を使用した。気圧と粒子数濃度を考慮し、富士山頂では流量を1.0 L/min に設定し、30分間捕集した。また、太郎坊では流量を0.85 L/min に設定し15~30分間捕集した。本研究では、富士山頂において捕集された2サンプル(2019/7/24 15:00, 7/25 15:00)と太郎坊において捕集された4サンプル(2018/7/20 16:00, 7/21 12:00, 16:00, 2019/7/25 15:00)との合計5サンプルの微小ステージを対象に個別分析を行った。

透過型電子顕微鏡(TEM; JEM-1400, JEOL)を用いて粒子の形態を観察し、エネルギー分散型 X 線分析器(EDS; X-MAX80, Oxford Instruments)を用いて粒子に含まれる元素を特定した。定量した元素は C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn の16元素で、得られた質量濃度割合を基にエアロゾル粒子を Carbon-rich (C-rich), 硫酸塩, 硫酸塩+鉍物, 海塩, 海塩+鉍物, 変質海塩, 変質海塩+鉍物, カリウム塩, カリウム塩+鉍物, 鉍物, その他の11種類に分類した²⁾。また, NOAA Hysplit Model³⁾を用いて後方流跡線を計算し, 気塊の由来を調べた。

3. 結果と考察

3.1 エアロゾル粒子の分類結果

分析した微小粒子の分類結果を図1に示す。山頂で捕集した2サンプルとも硫酸塩類が約40%以上を占めていた。また、鉍物粒子は山頂のサンプルにのみ見られた。後方流跡線解析³⁾より山頂の2サンプル共にユーラシア大陸を通過

し、山頂へ到達した気塊を採取したことが示された。

太郎坊で捕集した微小粒子は、山頂と同様に硫酸塩類が多く、いずれも粒子全体の約60%以上を占めていた。また、前年と比べ硫酸塩に鉍物が含まれている割合が多かった。後方流跡線解析³⁾より太郎坊の4サンプルいずれも、太平洋由来の気塊を採取したことが示唆された。

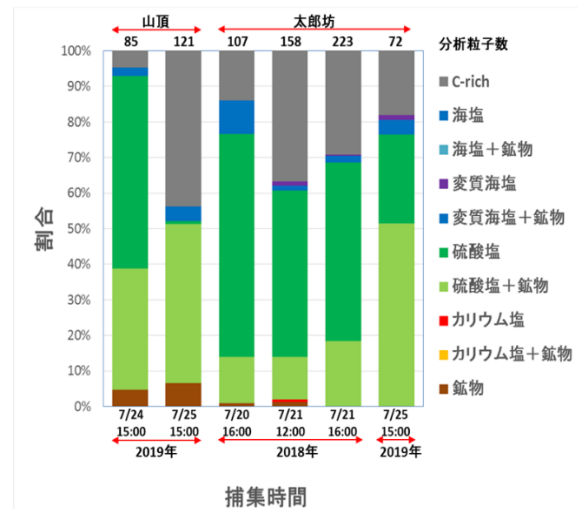


図1 山頂・太郎坊の組成分類結果

3.2 形状分類

粒子に決まった形はなく様々な形状で存在する。そこで Soot aggregation (50 nm 以下の粒子が凝集したような形状), Single circular or coccoid (球状, もしくは繭状の粒子であり, コントラストがはっきりしている形状), Eroded particle (浸食地形型で, コントラストがはっきりしている形状), Cluster (球状・繭状の粒子が凝集したような形状)と大きく4つに分類した⁴⁾。

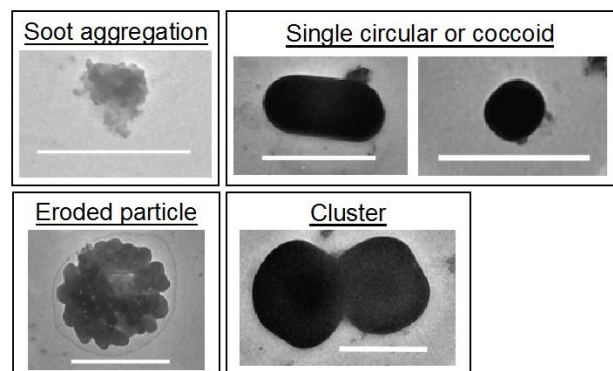


図2 形状分類

その結果、どのサンプルも Eroded particle が大多数を占めており、次点で Single circular or coccoid が多いという結果となった。それを踏まえて Single circular or coccoid と Eroded particle と分類されたものの組成分類を調べた。

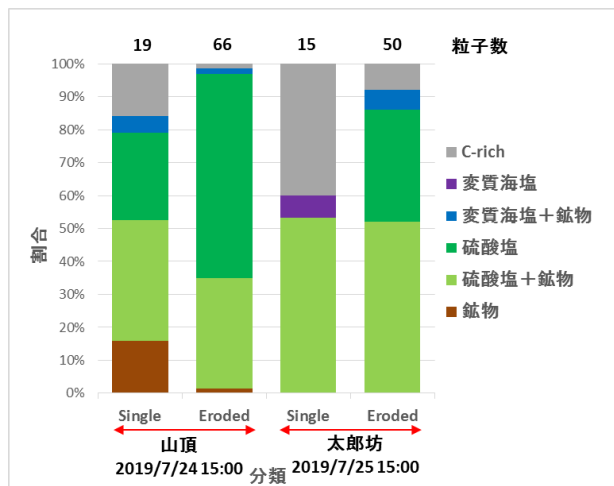


図3 組成と形状分類結果

太郎坊における Single circular or coccoid は殆どの硫酸塩に鉱物が含まれていた。また、山頂・太郎坊共に Eroded particle の方が硫酸塩類が多く、ほとんどが硫酸塩・硫酸塩+鉱物と分類された。これは硫酸塩によって浸食されていることを示唆している。

さらに Single circular or coccoid の粒子は電子回折法から明らかな硫酸アンモニウム ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) の結晶構造が観察されている⁹⁾ことから、2種類の粒子に含まれる窒素と硫黄の質量濃度を比較した結果を図に示す。

① 山頂 2019/7/24 15:00 Single の質量濃度分布

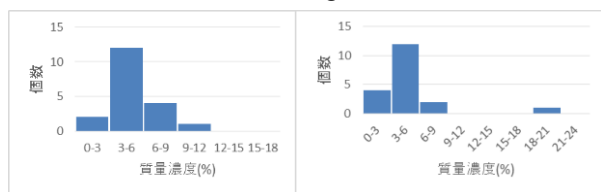


図4-a 窒素

図4-b 硫黄

② 山頂 2019/7/24 15:00 Eroded の質量濃度分布

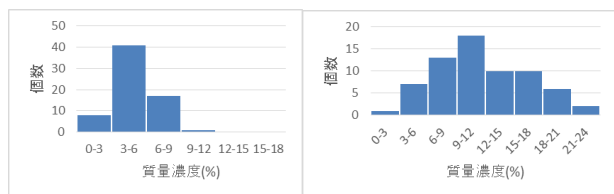


図5-a 窒素

図5-b 硫黄

硫黄は Eroded の方が多く含む粒子が多く、濃度の差も大きかった。窒素も Eroded の方が多く含む粒子が多かったがその傾向は顕著であり、かつ濃度の差は少なかった。

4. まとめ

富士山頂・太郎坊において微小粒子を捕集し、TEM-EDS を用いて分析を行った。両地点ともに硫酸塩の割合が高かった。鉱物は山頂に多く見られた。

更に形状で分類して窒素と硫黄の質量濃度分布を出した。窒素も硫黄も Eroded particle に多く見られたが、窒素は濃度の差が小さく、硫黄は差が大きかった。

謝辞

本観測は認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行われました。

参考文献

- 1) 土井瀬菜(2017):富士山頂で捕集した大気エアロゾルのバルク/個別粒子分析, 東京理科大学修士論文.
- 2) 吉末百花(2016):西経 170 度線南北縦断航海で得られた海洋性エアロゾルの個別粒子分布,東京理科大学卒業論文.
- 3) <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- 4) 児玉真一(2018):富士山頂・太郎坊で捕集したエアロゾル粒子の個別分析, 東京理科大学卒業論文
- 5) Ueda et al. (2011) Morphological features of soot-containing particles internally mixed with water-soluble materials in continental outflow observed at Cape Hedo, Okinawa, Japan, J. Geophys. Res., 116, D17207, doi:10.1029/2010JD015565

新型広帯域大気電場測定機器の実証実験

工藤剛史¹, 鴨川仁²

1. 音羽電機工業株式会社, 2. 静岡県立大学

1. はじめに

雷活動の危険性を事前に判断するためには、雷放電発生前の大気電場等の情報を得る必要がある。一般的に大気電場の計測には、回転型フィールドミル(以下、フィールドミル)が用いられる。晴天静穏時の地表大気電場強度は約 100 V/m 程度と微弱であるが、襲雷時には 10 kV/m 以上に達するため、ワイドレンジに測定できる必要がある。従来のフィールドミルで、サチュレーションを起こ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。そこで我々は、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共同開発した。気象条件の厳しい富士山頂は、夏期に数度雷雲内に入ることがあるため、過酷環境下で安定して、サチュレーションを起こすことなく大気電場を計測できることを検証するのに適する場所である。そこで、1号庁舎の屋上にフィールドミルを1台設置し、大気電場の連続観測を実施した。

2. 観測

1号庁舎屋上に単管パイプで固定してフィールドミルのセンサー部分を固定した(図 1(a))。建物内部にデータロガー機能を有するデータ受信部を設置し、電源とデータ受信ケーブルをインレットに通して配線した(図 1(b))。セットアップが完了した7月13日から撤去する8月23日までの間、周辺への落雷と台風接近による停電を除いて、安定してデータを取得できたことを確認した。図 2 に 7 月に計測した大気電場強度の時間変化を示し、図 3 に 8 月の同変化を示す。グラフの縦軸は電場強度を示し、強度の範囲は±100kV/m(50kV/m 毎に補助線)である。7月23日の午前1:30頃に富士山頂周辺に落雷が発生したが、フィールドミルはサチュレーションすることなくデータを取得することができた(図 4)。平面校正前のデータではあるが、電場強度の絶対値は 100kV/m を超えていた。GPS の 1 秒ごとのパルス信号についても安定して取得できていることが確認できた。

3. まとめ観測

本実証実験により、気象データや放射線データ、雷電流データ等との比較による詳細なデータ解析が可能になった。



(a)



(b)

図1 大気電場測定機器 (a) 1号庁舎屋根に設置したセンサー部分 (b) 屋内に設置したデータロガー部分

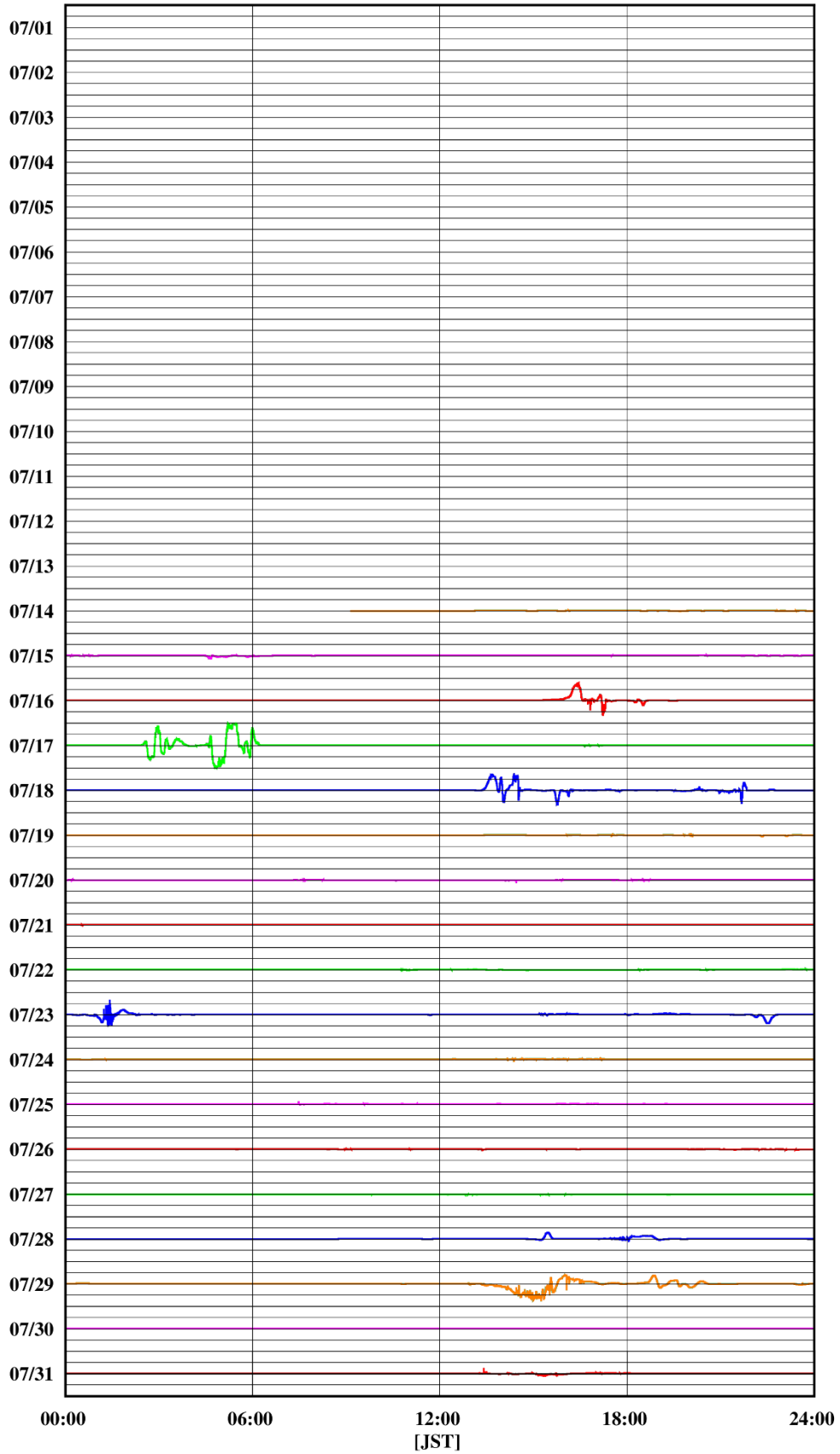


図2 2019年7月に計測した大気電場強度の時間変化

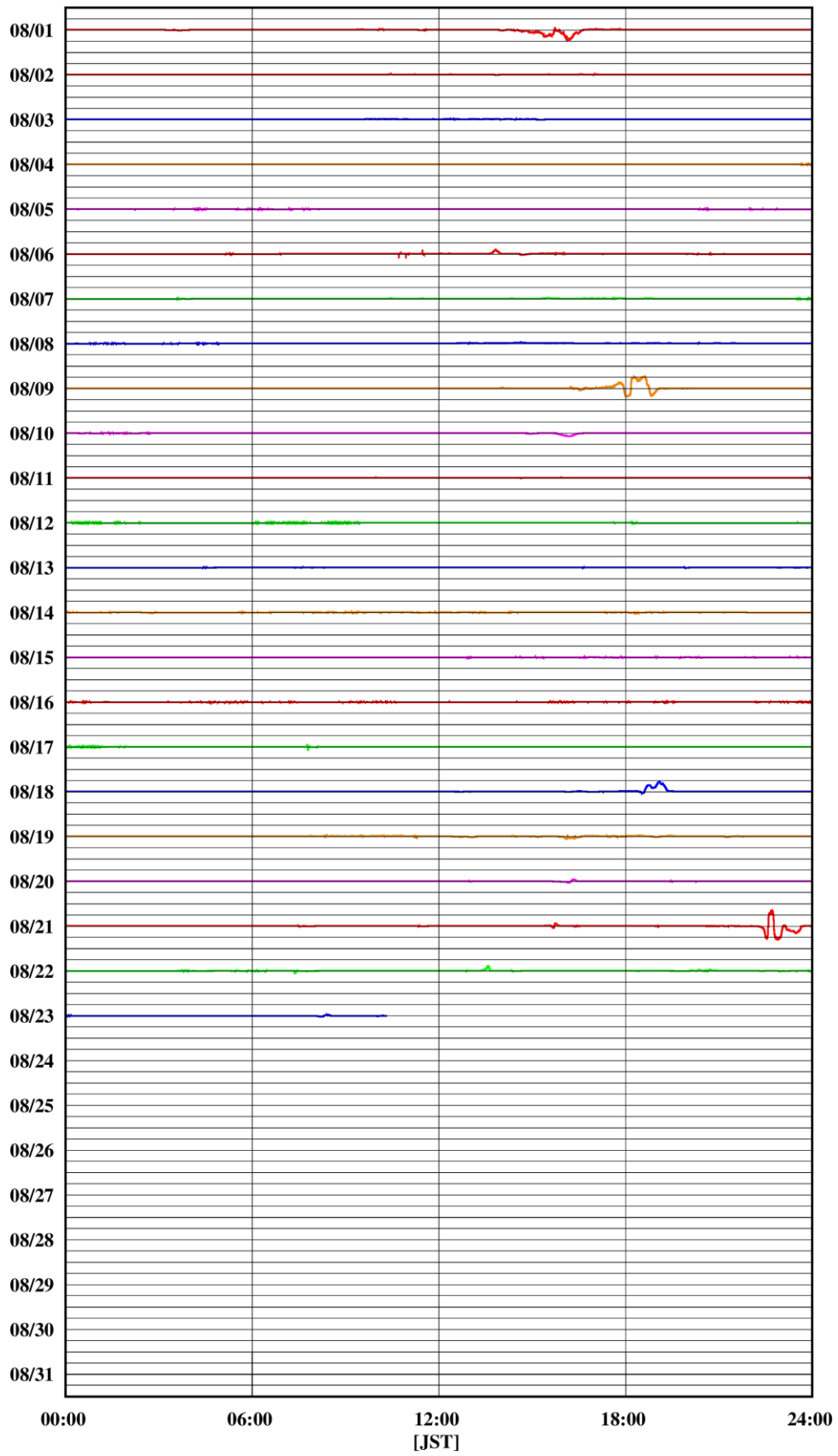


図3 2019年8月に計測した大気電場強度の時間変化

LATOM Mt.Fuji 2019-07-23 00:00-02:00am

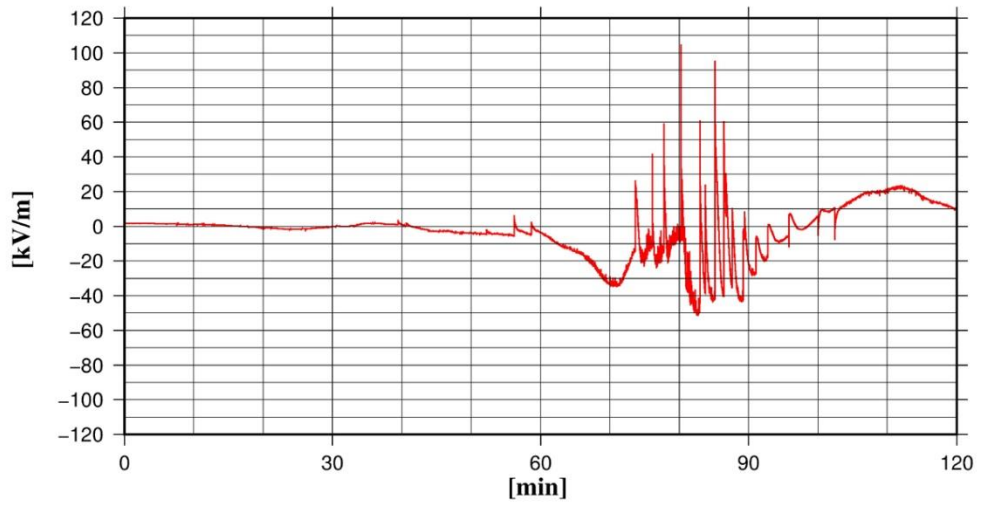


図4 2019年7月23日午前0-2時の大気電場強度の時間変化

2019年富士山頂における窒素酸化物の計測

松田響¹, 和田龍一¹, 緒方智大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, 鴨川仁⁷, 松本淳⁴, 米村正一郎⁸, 松見 豊⁹, 梶野瑞王¹⁰, 畠山史郎¹¹

1. 帝京科学大, 2. 大阪府立大, 3. 首都大東京, 4. 早稲田大, 5. 東京理科大, 6. 山梨大
7. 静岡県立大, 8. 農研機構, 9. 名古屋大, 10. 気象研, 11. 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り、オゾン、CO といった微量気体から、粒子状物質まで観測が行われている。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_z)の計測を行った。 NO_x や NO_z 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。2017年の観測では、化学干渉がなく、 NO_2 固有の吸収波長を用いることで濃度を正確に計測可能なレーザー分光法を用いて NO_2 濃度を計測したものの、装置が大掛かりであり、継続的な計測は難しかった。そこで2018年の観測では 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時間分解能は劣るもののコンパクトな分析手法を検討し、富士山頂での大気計測に応用した。しかしながらLEDの劣化が早く5日間のみでの計測であった。2019年の観測では改良した光分解コンバータを用いて NO_2 の計測を検討した。

2. 方法 富士山特別地域気象観測所にて、2019年7月

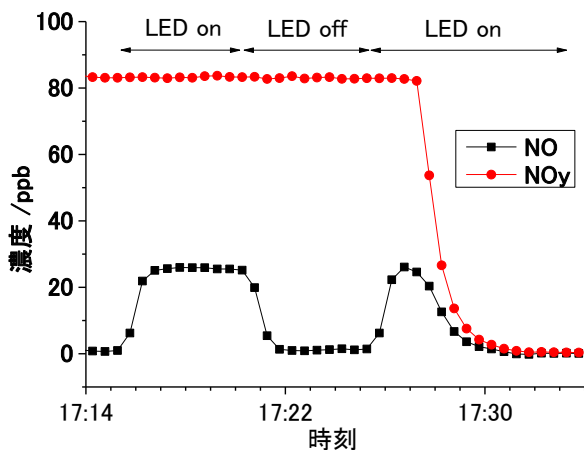


図1. NO_2 標準試料の測定結果： NO_y 濃度は NO_2 標準試料の濃度(約80 ppb)を示した。17:28ごろ NO_2 標準試料を止めると NO_y 濃度は低下した。 NO 濃度はLED offの際は0 ppbであるが、LED onのときは NO_2 がNOに変換され約25 ppbを示した。 NO_2 からNOへの変換効率は31±1%と見積もられ、観測結果の補正に用いた。

連絡先：和田龍一 (Ryuichi WADA) wada@ntu.ac.jp

15日～8月21日に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

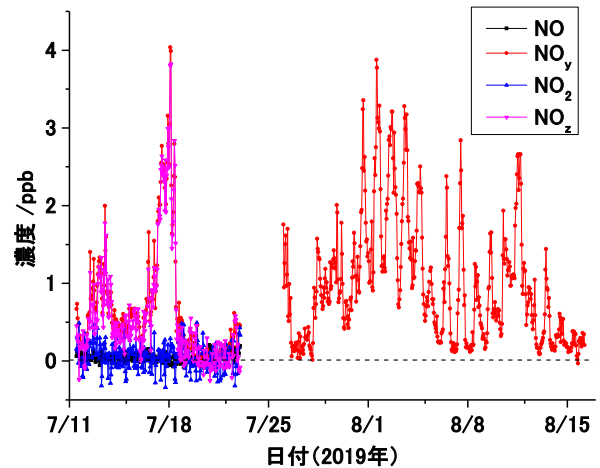


図2. 2019年夏季富士山頂で観測した窒素酸化物濃度 (NO , NO_y , NO_2 , NO_z 濃度)

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、観測期間の前後に富士山頂にて行った。 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(THORLABS社, 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 標準ガスを富士山頂にて測定することで求め、 NO_2 計測値の補正に用いた。大気サンプル装置は3号庁舎北側にある貯水タンク下に設置した。

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への変換効率の測定結果を図1に示す。変換効率は0.31±0.1と富士山頂での観測期間を通して一定であった。富士山頂のNO, NO_y , NO_2 および NO_z 濃度観測結果を図2に示す。 NO , NO_2 濃度は、7月23日の停電以降欠損した。図に示した期間の NO_2 , NO_y , NO_z 濃度はそれぞれ最大0.5 ppb, 4.0 ppb, 3.8 ppbであった。 NO 濃度は検出下限以下(0.2 ppb)であった。

4. まとめ 化学発光分析装置と光分解コンバータを組み合わせた NO_z 計測手法を開発し、2019年夏季富士山頂観測に適用した。 NO , NO_y , NO_2 , NO_z 濃度を明らかにした。

富士山頂に流入する大気中粒子状物質のオンライン分析 2019

竹内政樹¹, 前田夏穂¹, 和田莉緒菜¹, 田中 遥¹, 田中秀治¹, 戸田 敬², 大河内博³

1.徳島大学, 2.熊本大学, 3.早稲田大学

1. はじめに

経済発展の著しい東アジア地域では大気汚染が深刻化しており、その影響は周辺国のみならず地球規模へと広がっている。日本国内に越境輸送された汚染物質は、自然環境を破壊するだけでなく、呼吸器系や循環器系などの疾患リスクを上昇させる¹⁾。従って、我が国に流入する越境汚染物質を継続的にモニタリングして越境大気汚染の実態を解明することは、我々が安全・安心な生活を送る上で極めて重要である。これまでに我々は、水溶性ガスの連続捕集器を自作し²⁾、富士山頂の水溶性ガス成分を高時間分解観測することで、自由対流圏高度における酸性ガスの挙動を明らかにしてきた³⁾。一方、本研究では、社会的関心の高い粒子状物質にも着目し、新規に粒子状物質の連続捕集器を開発することで、自由対流圏高度の粒子状物質に含まれるイオン成分を高時間分解能観測できるシステムの構築を目指した。続いて、本システムを自由対流圏高度に位置する富士山頂で稼働させ、観測データを詳細に解析することで、日本国内に流入する越境大気汚染物質の動態について検討した。

化したためであろう。3成分とも夕方濃度が増加している。これは、帰宅ラッシュによる排出量の増加に加え、気温の低下によるガス成分の粒子化が促進したためと思われる。この後、夜間から朝方にかけて濃度が減少しているが、こ

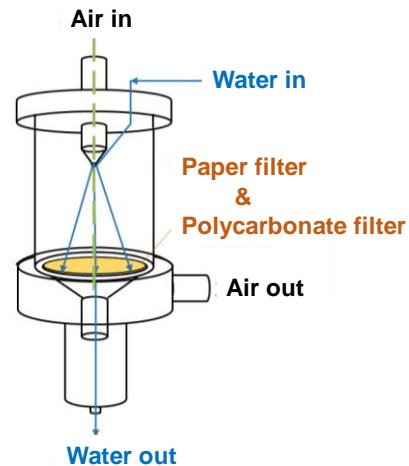


Fig. 1 Particle collector.

2. 粒子状物質捕集器の開発と徳島市における観測

Fig. 1 に、本研究で開発した粒子状物質捕集器の概略図を示す。大気サンプルは捕集器の上方より吸引され、エアノズルを通過してチャンバー内に運ばれる。一方、捕集液はエアノズルの真下に送液され、大気と衝突することによりミストが生成される。チャンバー内の粒子状物質は2枚の親水性フィルターで捕集・溶解抽出される。その後、粒子状物質はミストにより溶解抽出され、気液分離後、イオンクロマトグラフで測定される仕組みとなっている。新規粒子状物質捕集器を組み込んだ自動分析システムを地表面(徳島市)で稼働させ(2019年春季, 37日間), その捕集効率を測定したところ、いずれの成分(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})でも >98.4%と良好な結果を得た。また、連続観測後に捕集器の状態を確認したところ、フィルターの破損等もなく捕集器の耐久性についても問題ないことが明らかとなった。Fig. 2 に、徳島市における観測期間中(37日間)の主要陰イオン成分濃度を測定時刻毎に平均化したときの日内変動を気温、相対湿度のデータとともに示す。いずれのイオン成分も朝方に濃度の増加がみられるが、これは通勤ラッシュや始業による汚染物質の排出量が増加したためと思われる。3成分のうち、 NO_3^- で昼過ぎの明確な濃度減少がみられた。これは揮発性の高い NO_3^- が気温上昇により HNO_3 へと気

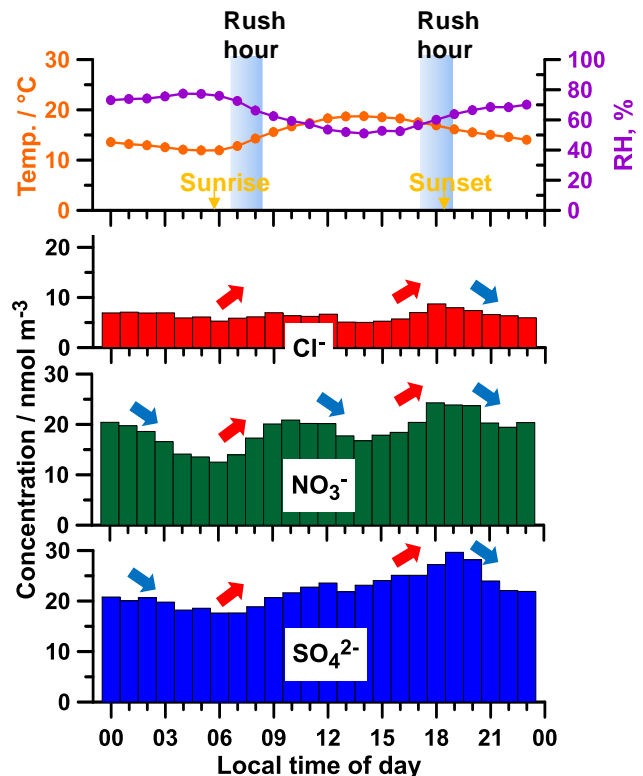


Fig. 2 Circadian variations of average particulate Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-} concentrations and meteorological data during spring in 2019 at Tokushima, Japan.

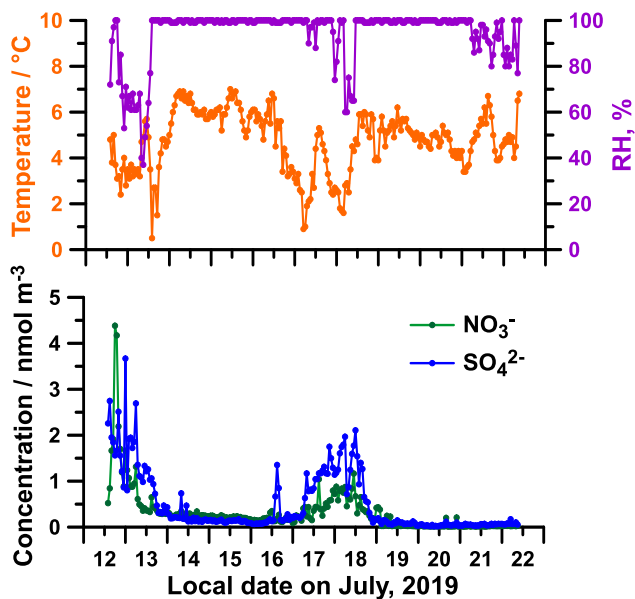


Fig. 3 Temporal variations of average particulate NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations and meteorological data during summer in 2019 on the summit of Mt. Fuji, Japan.

これは気温の低下によるガス成分の粒子化よりも、工場等の終業による排出量の減少の影響が大きいと思われる。このように、主要陰イオンの日内変動は、それぞれの要因が複雑に影響しあい、濃度の増減を繰り返しているものと思われる。

3. 富士山頂における観測

Fig. 3 に、構築した大気粒子状物質の自動分析システムを富士山頂(標高 3,776 m)で稼働させ(2019 年夏季, 10 日間), 粒子状 NO_3^- と SO_4^{2-} を連続測定したときの結果を示す。 NO_3^- と SO_4^{2-} の濃度変化は類似しており、観測開始頃と中頃に高濃度となる傾向がみられた。両成分の平均濃度は、 NO_3^- が 0.322 nmol/m^3 , SO_4^{2-} が 0.481 nmol/m^3 となり、いずれの成分も先に徳島市で観測された値よりも 50 倍程度低濃度で存在していた。Fig. 4 には、観測期間中に富士山頂に流入した気塊を後方流跡線解析した結果を示している。総濃度をみると、気塊 A が高く、気塊 B と C で低くなった。気塊 B, C は海上を通過しており、大陸の汚染源を通過していないため、比較的清浄な気塊であると思われる。一方、気塊 A の総濃度は、気塊 B, C に比べて 3 倍ほど高く、アジア近隣諸国から排出された大気汚染物質が富士山頂に流入した結果を反映しているものと思われる。

4. おわりに

富士山頂に流入する粒子状物質を自動追跡するために、新たな粒子状物質捕集器を開発した。本捕集器は自作のウェットデニューダー²³⁾と組み合わせて使用することができ、粒子状物質の捕集効率は、98.4%以上と良好な結果を示

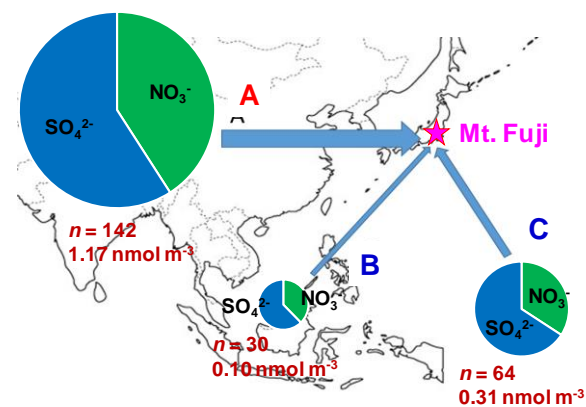


Fig. 4 Average particulate NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations classified according to the pattern of air parcel trajectory. The line width of the arrows shows the relative frequency of total air parcel trajectory. The numerical values and concentrations below the circular graphs show the sample number and the sum of the concentrations of NO_3^- and SO_4^{2-} , respectively. The size of circular graphs is proportional to the numerical values.

した。また、地表面では 1 ヶ月以上、富士山頂においては少なくとも 10 日間は連続測定が可能であり、耐久性においても問題ないと言える。この捕集器を用いた大気粒子状物質のオンライン分析システムを構築し、富士山頂における粒子状物質の連続観測を行ったところ、海洋から流入した気塊は比較的清浄であり、アジア大陸を通過した気塊には高濃度の NO_3^- , SO_4^{2-} が含まれていることが明らかとなった。

謝辞

本研究を進めるにあたって、公益財団法人 アサヒグループ学術振興財団より、研究補助をいただきました。厚く御礼申し上げます。また、富士山頂における大気観測では、認定 NPO 法人 富士山測候所を活用する会の皆様に大変お世話になりました。

参考文献

- 1) Jarvis, D. L., Leaderer, B. P., Chinn, S., Burney, P. G. (2005). Indoor nitrous acid and respiratory symptoms and lung function in adults. *Thorax*, **60**, 474-479.
- 2) Takeuchi, M., Tsunoda, H., Tanaka, H., Shiramizu, Y. (2011). Parallel-plate wet denuder coupled ion chromatograph for near-real-time detection of trace acidic gases in clean room air. *Anal. Sci.*, **27**, 805-810.
- 3) Takeuchi, M., Miyazaki, Y., Tanaka, H., Isobe, T., Okochi, H., Ogata, H. (2017). High time-resolution monitoring of free-tropospheric sulfur dioxide and nitric acid at the summit of Mt. Fuji, Japan. *Water Air Soil Pollut.*, **228**, Article: 325.

富士山剣ヶ峰における風の観測及び風速計の特性調査

安部大介¹ 大塚靖子¹ 吉田一成¹ 鴨川仁²

1. 株式会社ウェザーニューズ, 2. 静岡県立大学

1. はじめに

富士山の剣ヶ峰に設置した観測機で風速・風向を観測し、風速計の特性を調査した。2種類の観測機(試作機 wni02、Vaisala 社製の観測機)で計測した観測データを、近隣のウィンドプロファイラ(河口湖・静岡)の観測値から推定した剣ヶ峰の風速と比較した。ここでウィンドプロファイラ(河口湖・静岡)を用いた山頂の風速の推定においては、ウィンドプロファイラの観測高度の中で、富士山の山頂に最も近い高度で観測された風速データとアメダス(剣ヶ峰)で観測された風速の相関から剣ヶ峰の風速を推定するための関係式を作成し、ウィンドプロファイラの風速から剣ヶ峰の風速の推定値を計算した。

2. 結果

風向が約 170° から 210° の時、wni02、Vaisala 社製の観測機ともに風速の観測値は近隣のウィンドプロファイラのデータから推定した風速の値よりかなり小さくなった。今回の調査結果から、観測機器の設置環境や地形の影響によって強風を十分に観測できないケースがあることが分かった。

3. おわりに

できるだけ実際の風速に近い値で剣ヶ峰の風速の観測データを得るために、来シーズンは機器の設置環境ならびに斜面を吹き上がる風の鉛直成分も考慮した上で、観測方法及びデータの補正方法を検証していきたい。

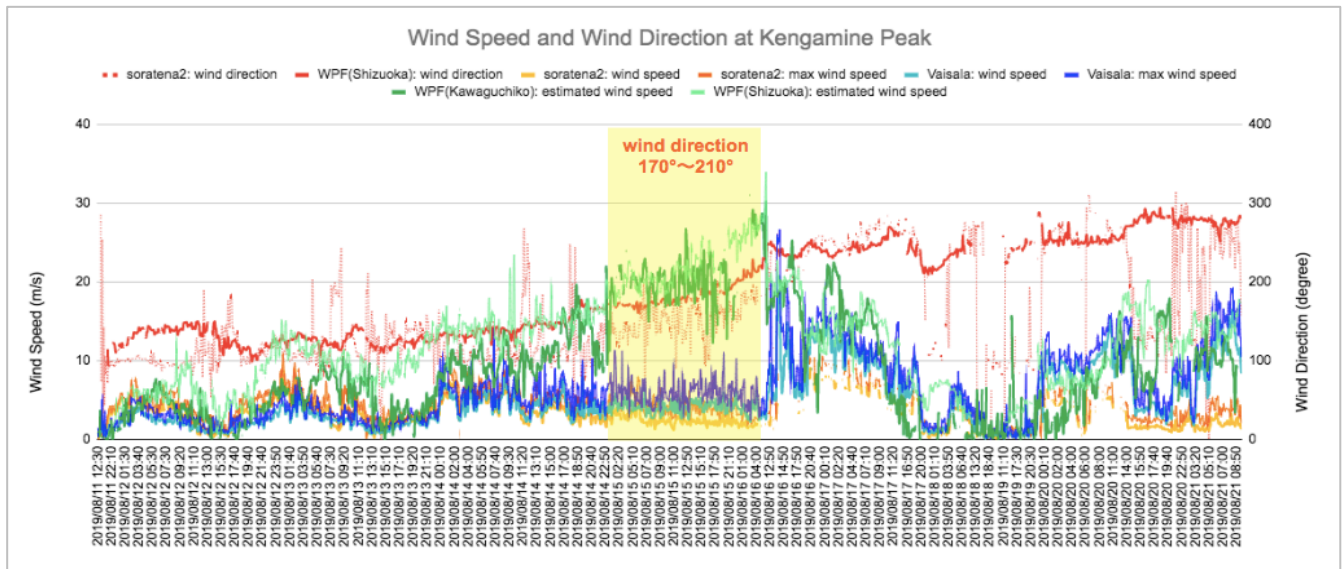


図1. 富士山(剣ヶ峰)で観測した風速・風向および、ウィンドプロファイラの観測データから計算した山頂の風速の推定値

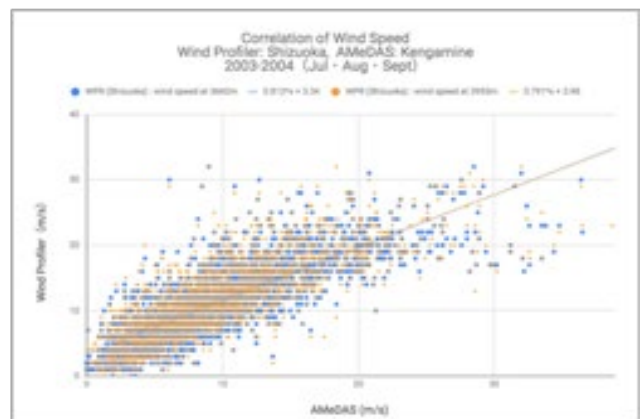
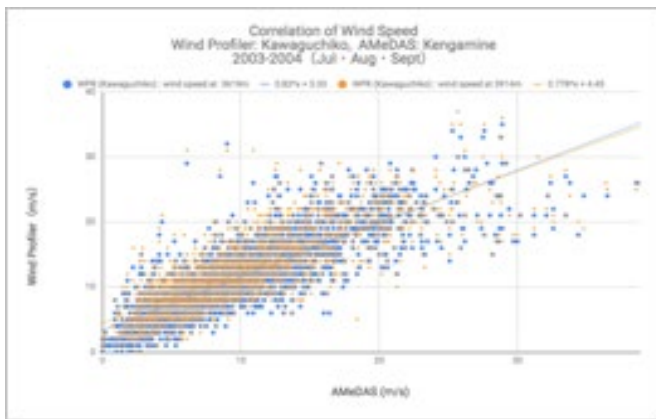


図2. アメダス(剣ヶ峰)とウィンドプロファイラの風速の相関(左:河口湖、右:静岡)。
 期間:2003年~2004年(7月1日~9月30日)。

ライブカメラによる光学観測

鴨川仁¹, 趙泰勇²

1. 静岡県立大学, 2. 株式会社 Cho&Company

1. はじめに

様々な研究分野で求められている山頂でのその場(insitu)光学観測を, 高性能ライブカメラ機器を用いて夏季期間24時間観測を行う。

2. 観測

本プロジェクトのライブカメラによって撮影された静止画・動画は, 夏期観測参加研究者に提供しており, これらはそれぞれの研究のデータ解析に用いられている。過去では大気電場変動と雲海の形成について議論したなどの成果が得られている。現在では, 従来から必要とされていた大気化学研究だけでなく, 積乱雲の上部にできる Jumping Cirrus などの研究にも用途が広がっている。そのためライブカメラでの映像の質の向上は, 常に求められており, 従来使用していた低画質カメラから高画質のカメラの変更が求められていた。カメラの機能としては7月上旬から8月下旬までの夏季中ライブカメラの屋外運用, リアルタイム動画配信およびデータのローカル保存が必要とされる。ここで本研究においては, Cho&Company 社の MORECA (MOBILE REMOTE CAMERA)を用いた。画質は 1280x720(高品質モード時)であり, 動画コマ数は 10fps(変動)となっている。設置方向と設置数については過去本 NPO において行われていた低画質カメラでの東西南方向3台から, 東方向1台のみ変更した。ライブカメラの動画は NPO の公式サイトから Youtube のシステムを組み込むことで常時動作確認できるほか, 一般公開とした。そのため環境省・山梨県・静岡県による富士登山のための総合サイト「富士登山オフィシャルサイト」などからもリンクを貼り, 多数の登山客や富士山に興味のある一般市民に活用されている。MORECA は低照度カメラであり赤外線カメラに比べて夜間に光源が取れる場所ではより映像が鮮明である(図1)。

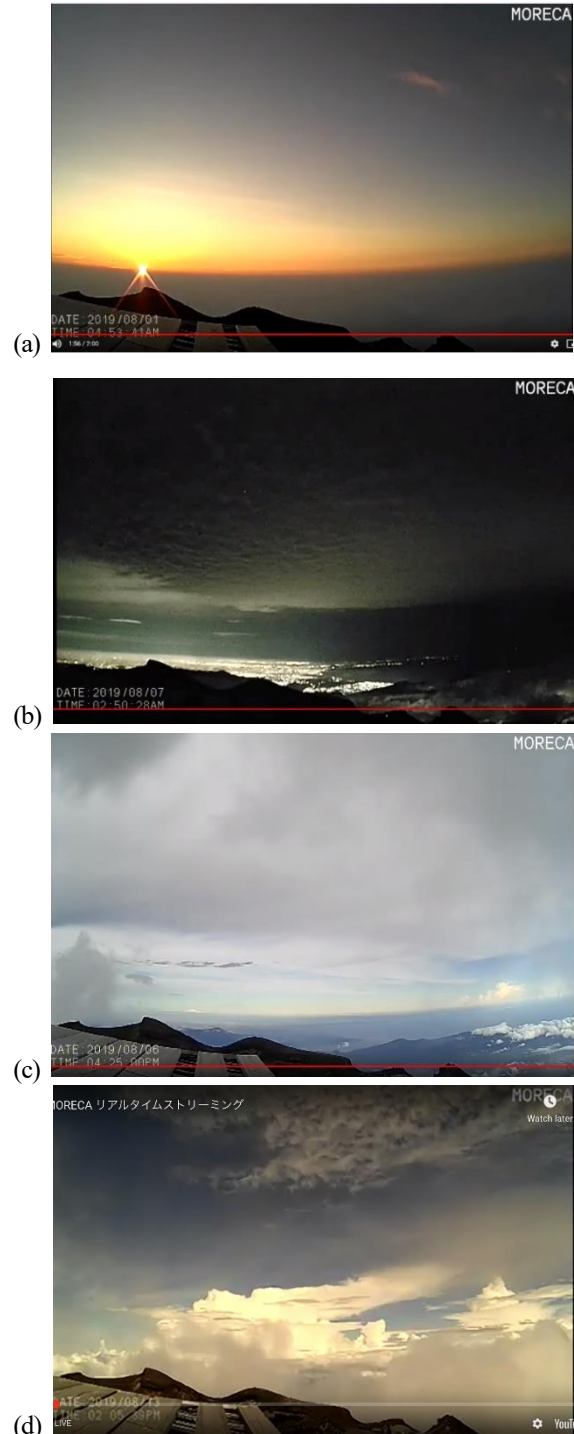


図1 MORECA による東方向の映像 (a) 御来光 (b) 夜景 (c) 神奈川方向の全容 (d) 積乱雲の発達時。

3. アクセス解析

次に、一般公開としたことによる利用者の反応を分析した。公開ホームページへのアクセス状態をしらべるために7月12日にGoogle Analyticsを設定した。その後、7月29日に『富士登山オフィシャルサイト』(環境省・山梨県・静岡県による富士登山のための総合サイト)、8月7日に『あっぱれ富士山』(夏期シーズン限定の登山情報サイト)からそれぞれリンクを貼った。夏季期間中のアクセス総ユーザー数は17,003ユーザーであった(図2)。

アクセスが多かった日は①860ユーザー(8月14日)②837ユーザー(8月21日)③825ユーザー(8月15日)である。また、図3に示された詳細分析によれば、(a) デバイス別では

モバイルが半数以上(55%)を占めている。(b) 流入元別ではReferral(参照元サイト=リンクを貼られたサイト)が70%を占めており、(c) その内訳は①「富士登山オフィシャルサイト」が40%、②「あっぱれ富士山」(夏期シーズン限定の登山情報サイト)が24%で、この2サイトで3分の2を占めている。ただし、②はリンクを貼った時期が8月7日と遅かったので通算では①より少ないが、それ以降の割合では①を上回り最多となっている。なお、(b) 流入元別のDirect(ブラウザのブックマークなど他のサイトを経由せずに来るアクセス)は23%で会員の方や夏期観測参加者などはこれに該当すると想定される。



図2 Google Analytics によるアクセスユーザー数の時系列分布 (2019/7/1-2019/8/31)

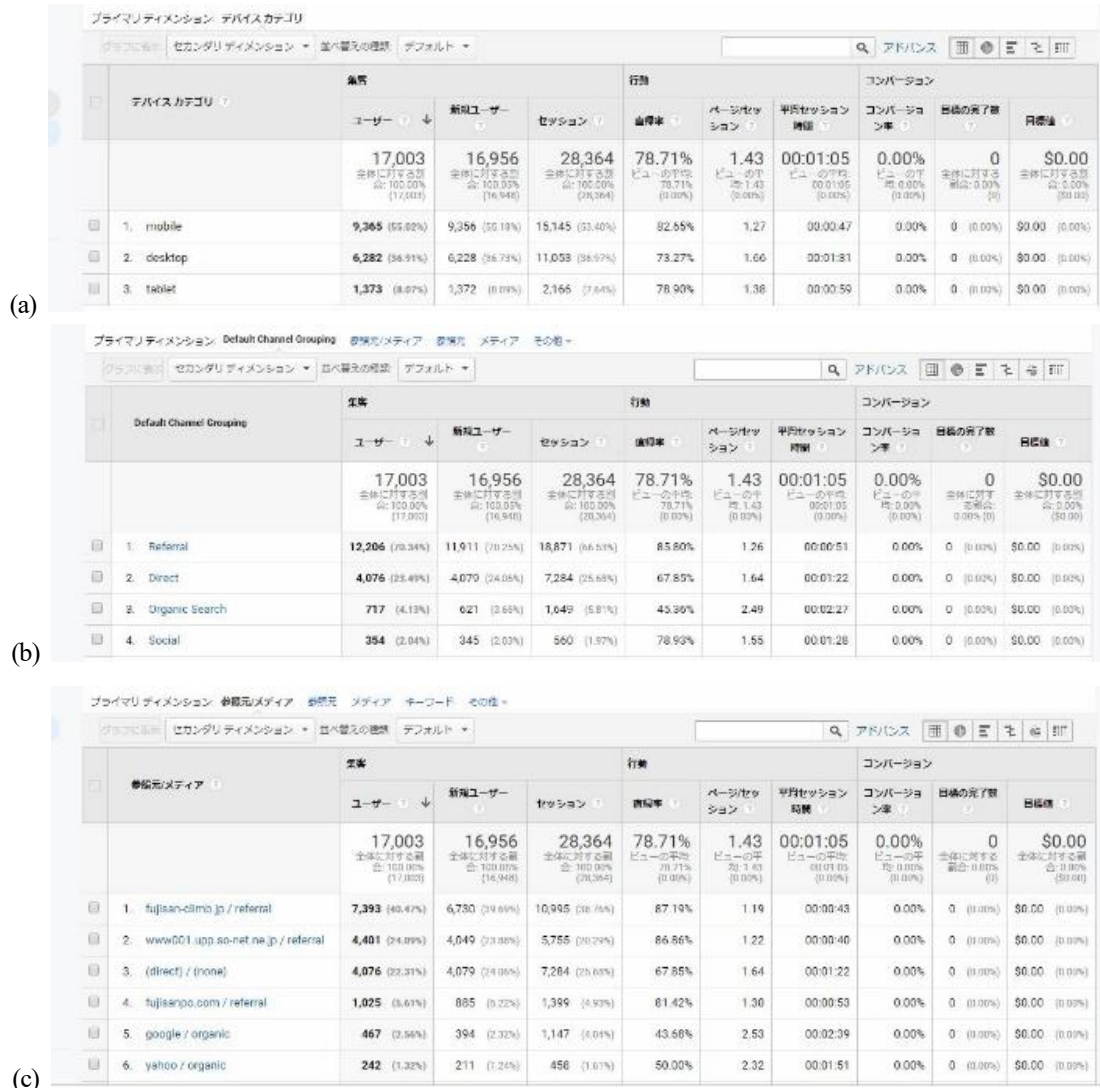


図3 利用者分析 (a) 利用デバイス, (b) 流入元, (c) 参照元の内訳.

ELTRES を用いた富士山頂通年科学計測

加藤俊吾^{1,2}, 荒島謙治³ 鴨川仁^{4,2}

1. 首都大学東京, 2. 富士山測候所を活用する会,
3. ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社, 4. 静岡県立大学

1. はじめに

ソニーは、高感度であることから遠距離や高速移動中でも安定的な無線通信を実現できる新たな低消費電力広域ネットワーク技術:ELTRES(エルトレス)を開発した。本無線通信技術は、空中線電力が 20mW の免許不要の特定小電力(Sub-GHz)無線でありながら、見通し 100km 以上の通信距離、および時速 100km 以上の高速移動中でも通信可能という特長を持つ。また ETSI (European Telecommunications Standards Institute)において国際標準規格として公開された。ELTRES 対応通信モジュールは商品化されており、2019 年秋に「ELTRES IoT ネットワークサービス」が開始予定である。本研究は、ELTRES を使用し、火山ガスおよび地磁気観測の越冬計測およびデータ転送を行った。

2. 富士山頂での ELTRES の概要

2018 年 8 月 22 日に開始した越冬通信実験では、富士山測候所の屋内窓際に ELTRES の送信機 4 台を設置して温度データを 920MHz の電波として空中線電力 20mW で送信し、100km 以上離れた東京都心を含む複数の実験受信局で安定受信し、1 年間の連続通信(送信頻度は 3 分に 1 回)に成功した。送信機を越冬設置することで、夏季観測が終了して無人となった測候所内の温度データをリアルタイムに把握することができた。冬季に商用電源の供給が無く通信手段が限られる富士山の山頂から、単一型リチウム一次電池 6 本だけで 1 年間の通信を実現できたことで、電源をあまり気にせず極地での環境科学の測定・研究を行うことができる。さらに、受信信号強度のデータを蓄積することで、気象変化による 920MHz 通信への影響がないことを確認できた。2019 年は、新たにアナログ 2ch 接続が可能な ELTRES 端末を使用し、火山ガスセンサーを接続して計測する越冬実験と、地磁気セン

サーと接続して計測する越冬実験を行った。また、ELTRES の新しい機材の安定稼働を確認する為、2018 年から動作している越冬機器 1 台を残置した。

3. 火山ガス観測

富士山頂での火山性ガスの越冬観測を目的として、閉所前に SO₂ センサーおよび H₂S センサーを設置し、これらの測定データを ELTRES により web サイトにリアルタイムでアップロードして閲覧できるようにした (<http://npo.fuji3776.net/info/H2S-monitoring2019.html>)。これらの測器は鉛蓄電池で駆動させており、電源解析では 2020 年の開所まで動作しつづける。2020 年 2 月末時点では順調に SO₂ および H₂S の測定データをリアルタイム配信している。

4. 地磁気観測

次に、噴火予測において重要な役目を担う全磁力観測を山頂で将来行うべく、観測システム全体の動作確認を測候所内において行う。全磁力測定は測候所内で行っているため測定値は意味をなさないが、ELTRES の通信、バッテリーの稼働など含めたシステムの動作を確認する。ただ越冬観測に入る前 2019 年 8 月 24 日~25 日に屋外で臨時観測を行い測定値の妥当性は評価した。火山性ガス観測と同様、2020 年 2 月末の時点では、システムは問題なく稼働していることが確認されている。

5. まとめ

現原稿執筆の段階では、越冬観測は終了していないが、順調に、ELTRES を用いた富士山科学計測ができる見込みができた。

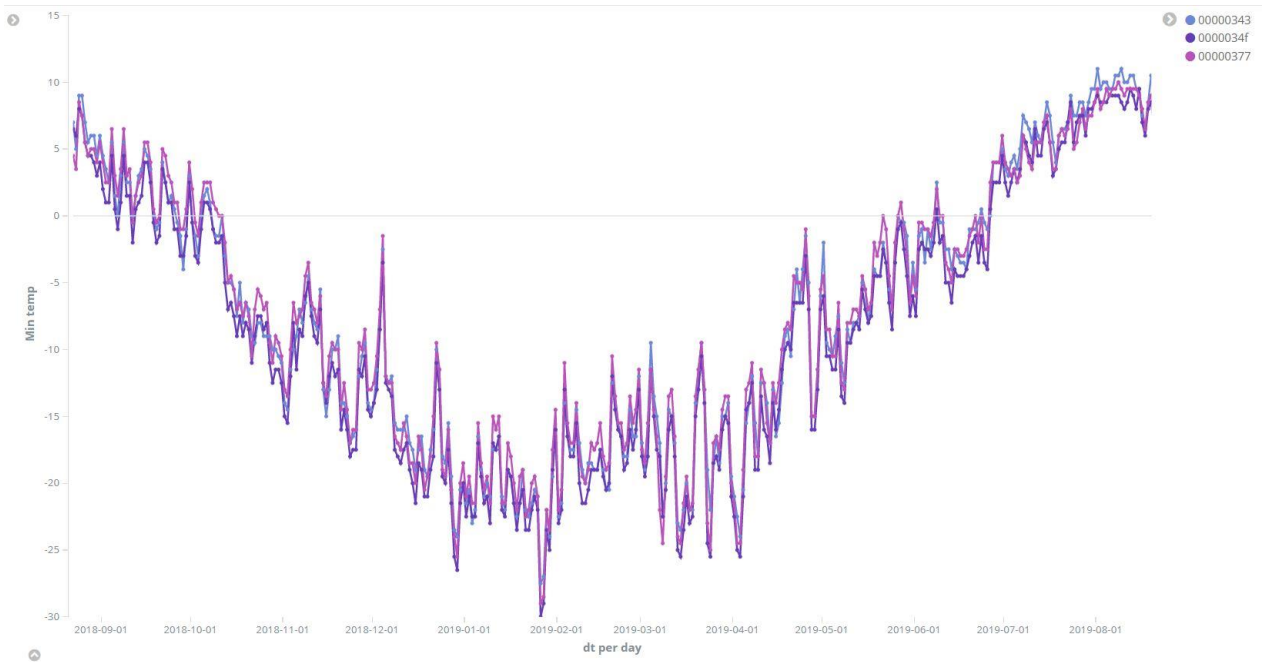


図2 測候所内の送信機の温度データ(最低値/日). 期間は2018/8/22~2019/8/21.

SO₂ 濃度



H₂S 濃度



図3 火山ガス計測 のリアルタイムデータ(例:2019年9月25日).

データ項目: geomag : Geomagnetic
 データ期間: 2019/08/25 00:00 ~ 2019/08/25 00:00
 リセット 実行

Tracked by:
ELTRES

geomag : Geomagnetic[nT] グラフ

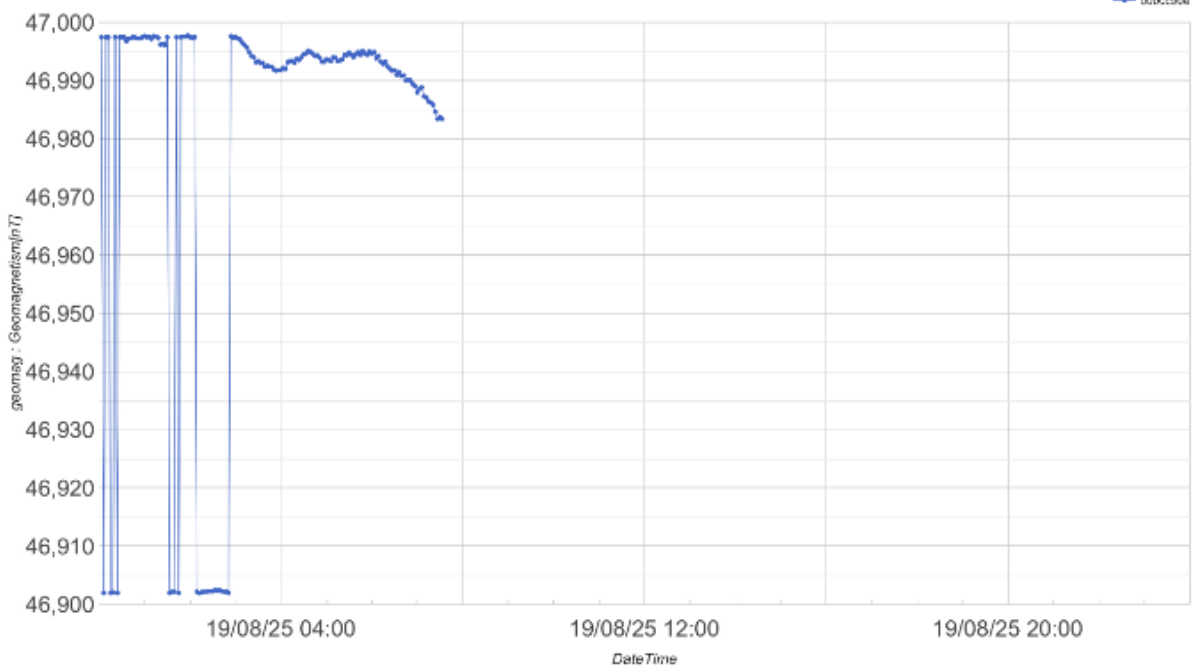


図4 火山ガス計測 のリアルタイムデータ(例:2019年9月25日).

成蹊高高度発光観測カメラによる富士山頂カメラとの同時観測

宮下 敦¹, 藤原 均¹, 鈴木智幸², 鴨川 仁³

1 成蹊大, 2 学芸大, 3 静岡県立大

1. はじめに

富士山頂と同じスペックの学芸大学スプライト観測システムが、2013年から成蹊中学高等学校屋上で稼働している。2018年度から、教材作成を主たる目的とした独自の観測カメラを成蹊大学理工学部を設置して、流星、TLEs等の高高度発光現象の観測を開始した。2019年は、通年で観測を実施し、8月には富士山山頂の学芸大学観測カメラとの同時観測に成功した。

本稿では、成蹊高高度発光観測カメラシステムの現状について報告する。

2. 成蹊高高度発光観測カメラシステム(表1)

成蹊システムは、基本、学芸大システムと同様のスペックの機材を用いているが、2台のカメラシステムを同架して、同じ方向を撮影し、1台にはフロント側に天体観測用の簡易分光フィルターをつけてスペクトルを動画撮像できるようにしてある点が特徴である(図1)。

撮像が安定するまでは、メンテナンスを容易にするために、観測カメラシステムは成蹊大学校舎ベランダに設置して

表1. 成蹊高高度発光観測カメラシステムの概要
・カメラ:WATEC-902HX, 752×582 CCD, 最低照度 2.5 × 10 ⁶ lx
・レンズ: Spacecom TV1634DC, 1.6 - 3.4mm 広角ズーム
・時刻記録:GHS-OSD
・動画キャプチャー:IODATA GV-USB2
・PC: ASUS X540LA
・簡易分光フィルター: Paton Hawksley SA200
・キャプチャーソフト: UFOCapture

いる。昼間の太陽光による機材の劣化を防ぐために、画角は北極星を中心として、東西方向約 60 度、地平から仰角 50 度までの範囲を撮像している。また、安価な電源タイマーを用いて、観測時間をコントロールしている。通常は、22 時 JST~翌日 6 時 JST まで撮像を行っている。夕方から夜 22 時くらいまでの間は、鳥やコウモリの他、学内警備などの影響を避ける必要がある。ただ、気象条件を見て、遠方の TLE が期待できるときなどは、観測開始時間を繰り上げることもある。

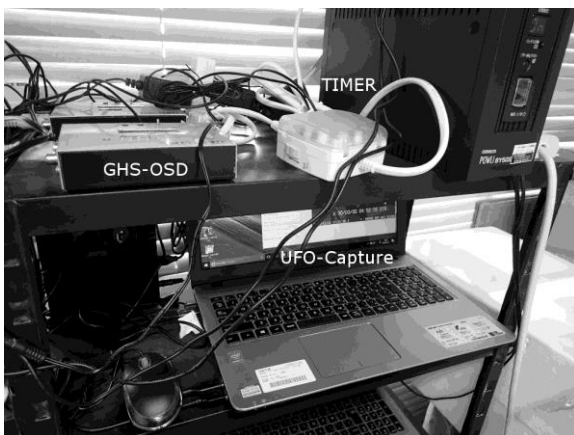
キャプチャーの条件はソフトウェア上で設定し、特に人工的な光源がある部分については画像マスクをかけている。しかし、長時間録画が止まらない原因を調べると、冬に木立が枯れて、それまで入らなかった街灯のちらつきがトリガーになっていたこともあった。

8TB 外付け HDD に記録された画像は、基本は翌朝にキャプチャー画像を確認して、高高度発光+雷光と思われるもののみを別のフォルダーに移して保管している。

3. 観測結果

2019年1年間で、流星・雷光・TLEsなど298イベント、動画容量(avi形式)で871GBの記録ができた。うち、スプライト映像は2イベントで、富士山頂観測期間中に撮影できたのは、2019/8/8 21:04:38 JSTの1イベントであった(図2)。

残念ながら、このイベントのときにスペクトル用カメラはソフトが落ちていて、記録ができていなかった。流星に関しては輝線スペクトルが取得できている。記録されているスプライトの輝度から見て、動画と同時にスペクトル観測も可能と考



(A) 記録部



(B) カメラ部分

図1. 成蹊高高度発光観測カメラシステム構成

えられる。

4. 今後の課題

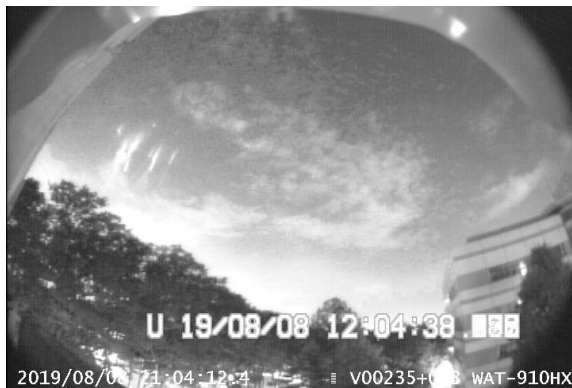
- 1) 大学校舎ベランダに仮設しているため、視野が制限され、人工的な光源の影響を受けるため、設置場所を変更する予定である。
- 2) 撮像用PCのスペックが不足しているのが主な原因で、システムが落ちることが頻繁にあるため、PCのスペックを上げて安定した撮像を目指す。
- 3) 学芸大システムと同様に、学外からもリモートメンテナンスできるネットワーク環境を導入する。
- 4) 撮像した動画のアーカイブを構築する。
- 5) 撮影したスペクトルの解析を含めて、理系大学初年級の高高度発光画像を活用した教材を開発する。

6) 将来的には、超高感度カメラシステムと狭帯域バンドパスフィルターによる薄明時(できれば昼間も)の高高度発光現象の動画撮像テストを行いたい。

7) 今回、富士山頂と同時観測に成功したので、主として流星観測に用いられている夜間高感度カメラを運用している観測者に呼びかけをして、富士山頂での観測期間に視野を指定してキャンペーン観測も可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木智幸, 鈴木裕子, 鴨川 仁, 宮下 敦, (2014), 高校へのスプライトの親雷雲観測用教材の展開. 学芸大紀要, 自然科学系, 66, 33-38.



(A) 成蹊学園(吉祥寺)



(B) 富士山山頂

図2. 成蹊学園と富士山頂で同時観測に成功したスプライト画像

旧富士山測候所における科学観測の火山防災・減災への活用可能性の考察

伊藤有羽¹

1.慶應義塾大学

1. はじめに

富士山は、日本で最も標高の高い美しい独立峰で、2013年6月には、関連する文化財群も含めて「富士山 - 信仰の対象と芸術の源泉」として世界文化遺産に登録された。開山期間には多くの登山客が訪れ、夏の二ヶ月間に20万人を超える¹⁾。年間を通してその景勝や構成資産を目的に多くの観光客が訪れる。静岡県、山梨県の2018年度の観光入込客数では、富士山周辺エリアでそれぞれ3368万人、1850万人と発表されている^{2,3)}。

富士山は活火山であり、周辺エリアでは火山防災マップの作成をはじめ防災の取組みが活発である。筆者も、防災教育の研究会に修士学生として所属し、富士山エリアを中心に外国人観光客の防災をプロジェクトとしている。研究会では社会科学の視点から人々の防災意識に切り込むことが多く、火山・噴火という自然現象を災害のもととして扱ってはいるが自然科学的観測・研究分野とのすれ違いを感じた。2019年夏期の富士山エリアの観光客へのインタビューや旧富士山測候所での観測補助を通し、同測候所における科学観測の火山防災への活用可能性を考察した。

2. 科学観測

富士山周辺においては防災科学技術研究所によって地震計・傾斜計が6地点、GPSが4地点に設置され、深部低周波地震を中心に火山活動が観測されている⁴⁾。2000年10月から2001年5月には、頻繁な深部低周波地震が観測され、火山災害影響の評価と対策を採る必要性が示されたことに対応する形で、内閣府の指揮のもと、富士山ハザードマップ検討委員会(現富士山火山防災対策協議会)が設置された⁵⁾。同時に、2001年から2004年に3つのサブテーマ「低周波地震とマグマ蓄積過程の研究」「噴火履歴の研究」「情報の高度化の研究」を持つ学術的研究がなされ、科学観測としては地震・地殻変動・地電位観測が行われ、低周波地震の震源位置、低比抵抗域の存在、火山活動にともなう顕著な地殻変動の異常はないことなどが報告された⁶⁾。2002年の広帯域 Magnetotelluric 観測では富士山全体の抵抗域の構造が明らかとなっている⁶⁾。Magnetotelluric 観測は現在行われていない。

火山ガスに関する科学観測については、本 NPO 法人富士山測候所を活用する会が、火山ガス起源の二酸化硫黄ガスのモニタリングを行っている⁷⁾。

3. 人々の防災意識

静岡県富士宮市に在住する人に富士山噴火に対する意識をインタビューでは、「... テレビで防災に関わるニュースが多いから、気にかけているよ。ハザードマップ(富士山火山防災対策協議会による富士山噴火の被害を想定した災害予測地図)も新しいものが出るみたいで、家の場所が大丈夫か知りたいのだけれど。新聞の折り込みに入るのかね...」と聞いた。実際に噴火が起きた時の行動や対応などは具体的に考えたことはなかった。また、富士宮口から富士登山をした外国人観光客15人の話も聞いた。彼らは富士山が噴火する可能性があることを知らず、また半数は地震に関しても日本では地震が頻繁に起き、富士山周辺も大きな地震が起こることがあるということ知らなかった。地震を体験したことのない人もいた。旅先での防災行動を何か行っているかという問いには、全員が何も行っていない・意識していないと答えた。富士山周辺に住む人と観光客合わせて20人にインタビューをしたが、富士山山頂に観測施設があると知っている人はいなかった。防災に関しても、地震を意識する人はいたが、噴火に対して具体的な防災行動を取っている人はいなかった。

旧富士山測候所においては、火山活動の観測を磁場観測含め拡充させること、観測を夏期に限定せず自動化したりリアルタイムモニタリングを可能にすることが、噴火予測の材料となり、減災・防災に繋がると考える。また、行政や研究者のみの防災とならないよう、人々へ科学的知見や観測結果を踏まえた富士山が活火山であることの認知と防災啓発も必要となる。地元メディアへの露出をはじめ短期的に富士山エリアに滞在する観光客・登山客への効率的なアプローチ方法もあるだろう。

4. 今後

インタビューを通しての人々の防災意識調査を行なったが、筆者の質的調査に対する理解の浅さが悔やまれた。「質的調査の方法-他者の合理性の理解社会学-(岸他, 2016)や「質的調査の方法[第2版]: 都市・文化・メディアの感じ方」(工藤他, 2016)などを参考に今後の調査は行う。

参考文献

- 1) 環境省(2019). 令和元年夏期の富士山登山者数について(お知らせ), http://kanto.env.go.jp/pre_2019/post_162.html.
- 2) 静岡県(2019). 平成30年度静岡県観光交流の動向,

<https://toukei.pref.shizuoka.jp/kankouseisakuka/data/21-010/documents/h30kankokouryunodoukou.pdf>

- 3) 山梨県(2019). 平成30年山梨県観光入込客統計調査報告書, <https://www.pref.yamanashi.jp/kankou-k/documents/h30houkoku.pdf>
- 4) 防災科学技術研究所. 第125回火山噴火予知連絡会資料
- 5) 藤田英輔(2009). 火山噴火予知研究の現状と今後の課題. 科学技術動向 2009年1月号, 20-33.
- 6) K. Aizawa, R. Yoshimura, N. Oshiman, K. Yamazaki, T. Uto, Y. Ogawa, S.B. Tank, W. Kanda, S. Sakanaka, Y. Furukawa, T. Hashimoto, M. Uyeshima, T. Ogawa, I. Shiozaki, A.W. Hurst. (2005). Hydrothermal system beneath Mt. Fuji volcano inferred from magnetotellurics and electric self-potential. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 235, 343-355.
- 7) 加藤俊吾ら (2020), *ibid.*

日本エクアドル外交樹立 100 周年記念友好登山隊

研究実施状況報告(於:エクアドル)

中谷 康司

中央大学経済学部准教授・同保健体育研究所研究員

研究の意義と目的

富士山などの自然環境を利用したトレーニングにより、4,000m 級以上の高山に向かう前に高所環境への順応を獲得する試みが行われ、トレーニング前後でのいくつかの生理的指標の変化から順応の効果が示されています 1)。しかしながら、その詳細は不明な点も多く、現地でのパフォーマンスとの関係も明らかにされていません。

そこで、本研究は同一登山隊(5,000m~6,000m 級の海外登山を予定)の参加者 14 名に対し、富士山測候所(以下、測候所)を用いた事前調査【8 月 17 日~19 日】、および現地調査(エクアドル)を実施し、事前調査の生理学的データ(後述)と、現地(ベース 4,800m 付近など)でのデータ、また現地登山活動でのパフォーマンスの比較を行うことを目的としました。

特に、睡眠時の体内酸素環境は睡眠の質に影響し、登山活動のパフォーマンスに大きく影響するものと考えられます。また、酸素の摂取状況はエネルギー代謝に大きく影響することから、血中のグルコースレベル、乳酸レベル、ケトン体レベルに変化がある可能性があります。従って、本研究では、特に睡眠中の血中酸素濃度推移とまた上記の生理学的な数値に注目して研究を行いました。

本研究で得られたデータは、高所医学の進歩に貢献するとともに、近年、盛んに企画されている高所観光(高所へのガイド登山を含む)を、短期間の準備で安全に実施できるようにするための新たな知見を提供できる可能性があります。また、限られたエネルギー補給の中で実施されるエクスペディションチャレンジにおけるエネルギー動態を明らかにすることにも貢献する可能性があります。

エクアドルでの高所測定は、現地での登山活動中、高所であるにもかかわらず、山小屋(4,800m)、交通(車、テレフェリコ)などが利用できる特殊な環境が揃っていることで可能となりました。また、今回は登山隊であるため、多くの方が同一の行程、同一環境にある状況で測定できるため、大変貴重なデータを収集することが出来ました。実際には、スケジュールの進捗など、様々な理由で必ずしも予定したデータの全てを測定することは出来ませんでした。今後、更なるチャンスがあれば、より有効な実験を実施することが出来ると考えられます。

測定実施状況

実施日程: 2019 年 9 月 1 日(日)~14 日(土)

対象者: 14 名(日本エクアドル外交関係樹立 100 周年記念友好合同登山隊)

測定項目: SPO₂、心拍数、血圧、急性高山病(AMS)スコア、乳酸値、ケトン体値、血糖値
あくまで調査は任意での参加とし、測定への全部、一部の不参加を妨げませんでした。

測定場所: 成田空港、キト市内、各登山活動

測定タイミング: 標高変化時、キトおよび高所(4,800m)滞在中、行動中など なお、SPO₂ については可能な範囲で就寝中継続して記録しました。

参加者 4 名(体力的に十分な余裕が期待される若年者)については ピチンチャ登下降時も SPO₂ の継続測定を実施しました。

※本研究は、中央大学保健体育研究所倫理委員会から承認を受けている研究計画「登山時の血中酸素濃度・心拍数・乳酸値・血糖値・ケトン体値の動態把握」(受付番号 19-4)の範囲内で実施しました。

実験担当者: 中谷 康司(中央大学経済学部准教授・同保健体育研究所研究員・博士(医学))

参考文献

- 1) 日本登山医学会編 急性高山病(高山病と関連疾患の診療ガイドライン) 中外医学社, pp.1-12,2017

測定の実施予定と実際の実施状況

日程	標高(m)	タイミング	登山班	トレッキング班	実施状況
9月1日	0	成田空港集合後	基本測定	基本測定	○
			&血糖値測定装置取付け		○
9月2日	2,800	ホテル到着後	基本測定	基本測定	×
		起床時	&夜間 SPO2(8名) 基本測定	基本測定	×
9月3日	3,000	テレフェリコ乗車前	基本測定	基本測定	○○
	3,950	テレフェリコ下車後	&行動中 SPO2(4名)		○
	4,698	展望台	基本測定 基本測定 基本測定		×
	4,784	山頂	基本測定 基本測定 基本測定		継続
	4,698	展望台	基本測定 行動中測定終了		
	3,950	テレフェリコ乗車前	基本測定	基本測定	○
	3,000	テレフェリコ下車後	基本測定	基本測定	継続
9月4日					
9月5日	2,800	出発前	基本測定 基本測定 基本測定		×
	3,914	キロトア湖到着キロトア湖	基本測定 基本測定	基本	×
	3,914	出発前コトパクシ車止め	測定		×
	4,500	ホセリバス小屋到着就寝前	基本測定		3,400m
	4,800	起床時	基本測定 基本測定		○
9月6日	4,800	山小屋	基本測定		×
					○
9月7日					
9月8日	2,800	キト市出発時	基本測定 基本測定		×
	4,800	チンボラソ山小屋到着就寝前	基本測定		○
		起床時	&夜間 SPO2(8名)		×
9月9日	4,800	山小屋	基本測定		6名
	2,800	キト市到着	基本測定		×
9月10日					

2019年富士山での雷活動高エネルギー放射線観測

鴨川仁¹, 榎戸輝揚², 和田有希³, David Smith⁴, 鈴木智幸⁵

1. 静岡県立大学, 2. 理化学研究所, 3. 東京大学,
4. カリフォルニア大学 サンタクルーズ校, 5. 東京学芸大学

1. はじめに

自然に存在する放射線として, 1900 年前後に Becquerel や Curie らが発見した地殻由来のもの(ウラン鉱), 1912 年に Hess が発見した宇宙線がある. そして近年, 雷活動及び雷雲に伴う高エネルギー放射線が発生していることがわかってきた¹⁾. この高エネルギー放射線は, 落雷時に発生する数ミリ秒オーダーのショートバーストと, 雷雲の通過時に発生する数秒から数分オーダーのロングバーストとの 2 種類に分類される. これらの放射線バーストの発生機構として, Relativistic runaway electron avalanche(RREA)説が提案されている²⁾. RREA は宇宙線などから生じた電子が, 雷雲内部の強電場で加速され逃走電子(Runaway electron)となり, 空気分子と衝突して雪崩的に電子を生じさせ, 制動放射による高エネルギーの放射線を放出するメカニズムである.

本研究では, 2013 年及び 2016 年に富士山頂で観測された夏季雷雲起原のロングバーストの観測のような事例を得るために, 観測を行った.

2. 観測方法と結果

夏季雷雲の雲底高度は数 km にも及び, 雷活動及び雷雲に伴う高エネルギー放射線を地上で観測することは, 大気中の減衰によりほとんど不可能である. そこで 7 月から 8 月にかけて, 雷雲に接近することのできる高度 3,776m の富士山頂にてロングバースト観測を行った. 2013 年には富士山測候所 1 および 3 号庁舎に放射線測定装置(GROWTH)を設置した. さらに放射線バーストの源である雷放電や雷雲の挙動を検知するため, 1 号庁舎屋根に大気電場観測装置(音羽電機社製フィールド・ミル)(工藤&鴨川)を設置した.

その結果, 本年度は雷活動が山頂に幾度かあったものの(図 1), 高エネルギー放射線は検知されなかった.(図 2)

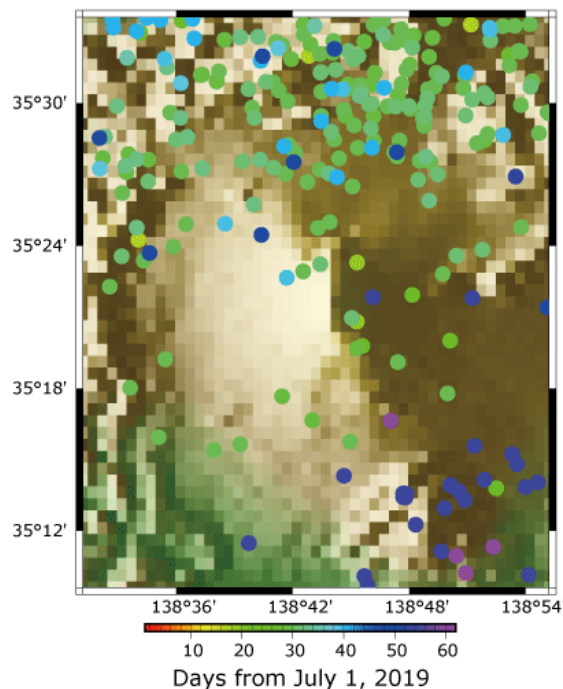


図 1 Blitzortung による対地雷観測.

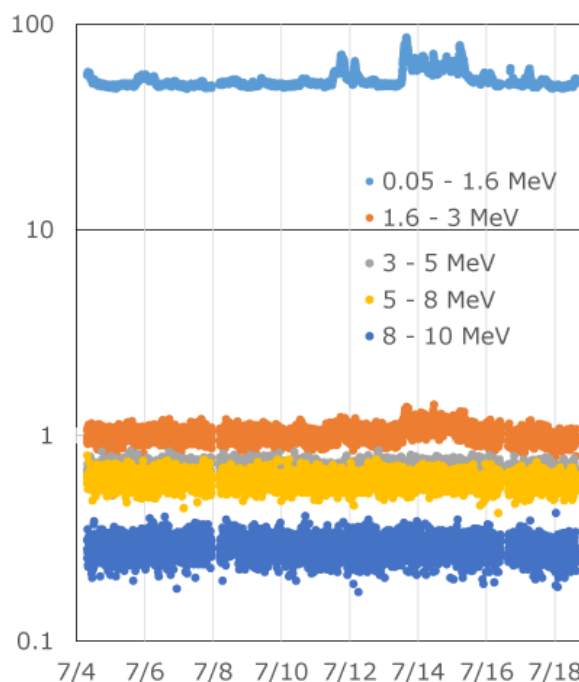


図 2 GROWTH によって得られたエネルギー別放射線カウント値

参考文献

- 1) J. R. Dwyer et al. (2012). High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, *Space Sci. Rev.*, 173, 133-196.
- 2) A. V. Gurevich et al. (1992). Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm, *Phys. Lett. A*, 165, 463-468.

富士山頂を活用した災害時 LPWA 通信の検討

湯瀬裕昭¹, 鍋田真一², 菅原巧貴³, 鴨川仁¹

1. 静岡県立大学, 2. 城南静岡高等学校, 3. テクノサイト

1. はじめに

東日本大震災では、広範囲で停電が起き、地震の揺れや津波などによる建物や人的な被害が大きく、特に津波の襲った沿岸部では、長時間にわたり停電や通信の途絶が続いた。今後、南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生が懸念されている。南海トラフ巨大地震が起きた場合、非常に広範囲にわたって被害を受け、静岡県でも長時間の停電と通信の途絶が起きる可能性が高い。このような状況でも、広域で情報伝達が行える通信手段が求められている。

2. LPWA の通信実験

停電や通信途絶などが発生する大規模災害時の通信手段の一つとして LPWA (Low Power Wide Area) の活用を考えている。静岡県内における広域での通信を確保するために LPWA の送受信局を富士山頂に設置した場合、どの程度の範囲まで通信可能かを調べるため、実際に富士山測候所にプライベート LoRa の中継装置を設置し、下界から富士山頂の中継装置向けに通信を行い、そこから中継された通信を下界で受信する実験を行った。LPWA 通信の機器として、GREEN HOUSE 社の RM-92A シリーズ用開発キットを使用した。予備実験として、2019 年 8 月 11 日の御殿場口から富士山頂への移動中に通信実験を行った。その後、8 月 11 日から 8 月 25 日まで富士山測候所に LPWA 中継装置を設置した通信実験を行った。LPWA 中継装置は単 3 乾電池 4 本で駆動した。

(1) ブルドーザ登山時の通信実験(移動実験)

御殿場口新五合目の駐車場に LPWA の送受信装置を設置(図1)し、ブルドーザ内に設置した LPWA 中継装置(図2)



図1 御殿場口での通信実験の様子



図2 ブルドーザ移動中の通信実験の様子

との間で通信実験を行った。約 10 秒ごとに駐車場の LPWA 送受信装置からデータを送信し、ブルドーザの LPWA 中継装置でデータを受信し、そこから駐車場の LPWA 送受信装置にデータを送り返したが、登坂の途中でデータ通信が途切れがちなエリアがあり、山頂が近づくにつれて通信ができなくなった。

(2) 富士山測候所からの通信実験(固定設置実験)

最初に、2号庁舎談話室の窓に LPWA 中継装置を設置し、静岡県立大学に設置した LPWA 送受信装置と通信ができるかの確認を行った。通信できることを確認した後、本格的に通信実験を行うため、1号庁舎 2 階の窓に LPWA 中継装置を設置した(図3)。その後、以下に示す通信実験を行った。

- ① 静岡県立大学と富士山測候所の間で通信中継の実験
- ② 静岡県立大学から送信されたデータを富士山測候所で中継し、水ヶ塚公園駐車場で受信する実験
- ③ 富士川河口近くの河川敷と富士山測候所の間で通信中継の実験
- ④ 島田市の蓬萊橋近くの河川敷と富士山測候所の間で通信中継の実験
- ⑤ 島田市の牧之原公園と富士山測候所の間で通信中継の実験

富士山測候所に設置した LPWA 中継装置を介して行った①から⑤までの通信実験は全ての地点での通信に成功し、富士山測候所で中継した最長の地点は牧之原公園である。

次に、富士山測候所経由の通信の安定度の定点調査を行うため、静岡県立大学に設置した送受信装置から富士山測候所の中継装置を介した送受信を定期的に行い、数日に

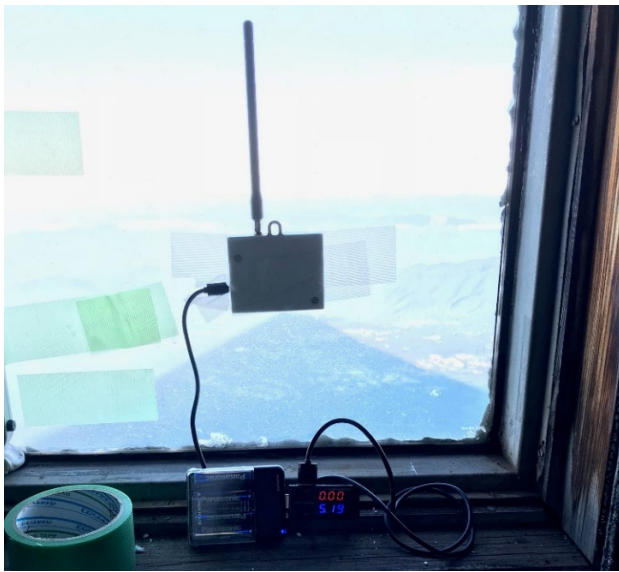


図3 1号庁舎2階での通信実験の様子



図4 牧之原公園での通信実験の様子

わたって電波強度のデータを取得した(図5)。この実験は、途中で乾電池を交換し、2回に分けて行った。静岡県立大学と富士山測候所の間でほぼ安定して通信できることを確認できた。



図5 静岡県立大学での通信実験の様子

本実験で、中継装置の設置地点と送受信装置を設置して実験を行った地点を地理院地図(国土地理院)の上を示す(図6)。本実験により、富士山測候所から最長で約81km離れている地点からの通信を中継できることが確認できた。また、約48km離れている静岡県立大学との間で昼夜問わず数日間にわたって通信できることも確認できた。しかし、富士山測候所から半径81km内であれば、全ての地点と通信できるわけではなく、本実験では間に障害物がなさそうな地点を選んで実験を行った。



図6 中継と送受信の実験地点

3. おわりに

富士山頂の高さを活かして、LPWAの中継装置を富士山測候所に設置した通信実験を行った。約81kmの長距離でLPWAを使った双方向通信が行えることが確認できた。

今後は、今回の実験で得られたデータを基礎データとして、もっと長い期間での通信状況の計測や富士山測候所でのデータ送信にLPWAを活用して行くことなどの検討を進めていきたいと考えている。



第 13 回成果報告会講演予稿集

2020 年 3 月 10 日発行



認定 NPO 法人
富士山測候所を活用する会

〒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