

2018年大気電気・雷研究グループの成果概要

鴨川仁¹, 鈴木智幸¹, 源泰拓¹, 安本勝², 佐々木一哉³, 榎戸輝揚⁴, David Smith⁵,

Gregory Bowers⁶, 工藤剛⁷, 和田龍一⁸, 加藤俊吾⁹, 三浦和彦¹⁰, 大河内博¹¹

1.東京学芸大学, 2.ヤマザキ, 3.弘前大学, 4.京都大学, 5.カリフォルニア大学サンタクルーズ校,

6.ロスアラモス国立研究所, 7.音羽電機, 8.帝京科学大学, 9.首都大学東京, 10.東京理科大学, 11.早稲田大学

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 2018 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。2018 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) 雷活動において発生する高エネルギー放射線、2) 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、3) 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、4) 新型広帯域大気電場測定機器の試験、である。



図 1 大気光観測の静止画事例。左下が東向き。

2. 観測結果

1) については報告すると 2018 の夏では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。2) の観測においては別稿(伊藤ら)で紹介しているが山頂の天気が良好でなく可視が期待できる日には得られず一度も事例を得ることができなかった。3) については、2017 年と実質同一のシステムの設置を行ったが、装置の不具合が山頂で発生し、復旧できずに夏季期間の観測が終了した。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。また、2018 年より新しい観測機器の試験観測を行った。その観測の一つは、大気光観測であり、OH 帯の観測をした(図 1)。また、広域雷放電位置同定システム(Blitzortung)を山頂に夏季期間導入し、極めて良好な機器運用が確認できた(図 2)。

3. 観測結果

以上の結果より過去の山頂観測の中で最も事例が得られない結果となった。新規観測については、大気光、雷放電位置測定いずれも良好な装置の動作確認が行えたため 2019 年には本格観測を行う予定である。

Station City	Comment	Country	Status	Last signal	Signal Effectivity	S Effectivity	H Effectivity	L Effectivity	
2023 Noto		Japan	Running	2018-08-05 09:22	14	0	0%	15	0%
2028 Higashimurayama		Japan	Running	2018-08-05 09:22	1150	3	10%	87	9%
2152 Mt. Fuji		Japan	Running	2018-08-05 09:22	1229	0	0%	259	22%
2159 Sakata		Japan	Running	2018-08-05 09:22	884	159	0%	214	4%
2030 Nagata	Blue/Indoor	Japan	Running	2018-08-05 09:22	4760	0	0%	235	10%
1593 Yagawa	Initial testing	Japan	Running	2018-08-05 09:22	434	0	0%	21	52%
2181 Yokohama, Hodogaya-ku	Semai Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-07-28 10:03	0	0	0%	0	0%
2182 Tokyo, Chiyoda-ku	Semai Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-07-10 10:28	0	0	0%	0	0%
2183 Yokohama, Hodogaya-ku	Semai Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-04-15 11:35	0	0	0%	0	0%
1413 Yamato	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	232	0	0%	4	0%
1449 Choshiroga	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-05-23 23:44	0	0	0%	0	0%
1400 West Tokyo	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	4938	0	0%	9	0%
1442 Kashiwa	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	1596	0	0%	118	7%
1517 Yokohama, Hodogaya-ku	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-04-14 03:35	0	0	0%	0	0%
1820 Saito	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	8700	5	0%	282	8%
1530 Tokyo	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	1814	0	0%	284	32%
1531 Utsunomiya	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	12708	0	0%	182	2%
1580 Toyama (Under construction)	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-08-05 09:20	0	0	0%	0	0%
1588 Utsunomiya	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-08-05 09:19	1702	0	0%	10	0%
1587 Okazawa	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-03-03 09:30	0	0	0%	0	0%
1628 TBS*	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2017-07-21 09:07	0	0	0%	0	0%
1640 Hyogo	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Offline	2018-08-02 07:30	0	0	0%	0	0%
1646 Sapporo	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	1800	0	0%	201	24%
1704 Fukui	Shonan Institute of Technology Japan	Japan	Running	2018-08-05 09:22	876	0	0%	1	36%

図 2 山頂機器が Blitzortung ネットワークに参加。図は日本の観測地点リスト。Web 上で稼働状況が常に確認できる。

地上可視カメラ、ひまわり8号、ラジオゾンデを用いた Jumping Cirrus の発達過程の観測

瀬口貴文¹, 岩崎杉紀¹, 鴨川仁², 牛山朋来³, 岡本創⁴

1. 防衛大, 2. 学芸大, 3. 土木研, 4. 九大応力研

1 はじめに

Jumping Cirrus (JC) とは、発達した積乱雲のかなとこ雲 (anvil) 上部で飛び上がり、消えていく雲の現象である (図 1) . 飛行機観測で初めて発見された¹⁾. 3 次元非静力学雲モデルを用いた数値実験によると、JC は非断熱過程 (重力波の砕波) により発生すると推測されている²⁾.

可視カメラによる観察から、飛び上がった JC の一部が昇華することにより、積乱雲上部に水蒸気を輸送すると考えられている. したがって、積乱雲が圏界面まで達していれば、下部成層圏を加湿する可能性がある. JC の雲粒の昇華による積乱雲のオーバーシュートの上の成層圏の加湿を、衛星データで示した報告もある³⁾. JC は、1 日に全球で約 5 億トン⁴⁾の水蒸気を成層圏に運ぶと推定されており⁴⁾, この現象による成層圏・対流圏間の水蒸気輸送の機構がわかれば、成層圏の水蒸気量の推定に寄与することが期待される.

JC は観測事例が少なく、観測を基に JC 自体やその周囲の環境の物理量を解析した研究が極めて少ないため、発生条件や規模、頻度といった基本的な性質が未解明である. そこで、本研究では初めて、地上可視カメラ観測で捉えた複数の JC の事例の解析を試みた. JC の形態と時間発展を追い、その特徴と周囲の環境状態を定量的に理解することを目的とする.

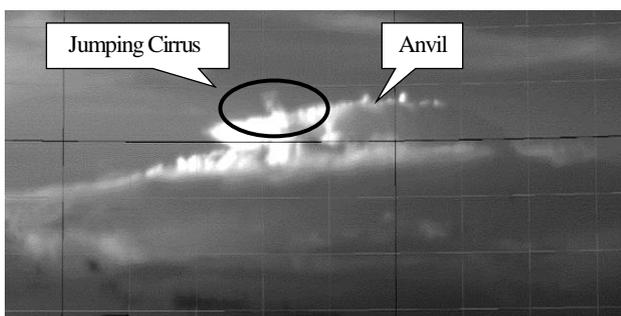


図 1. 栃木県鹿沼付近で発生した積乱雲と JC. 2016 年 8 月 4 日 18 時 18 分 (日本時間), 防衛大学校で撮影.

2 観測

2016 年の 7-8 月の間、富士山頂と防衛大学校 (横須賀市) に可視カメラを複数台設置して、15 秒間隔で関東周辺域の定点パノラマ撮影を続けた. 観測範囲は富士山・防衛大を基点に、概ね北西 (石川県・能登半島) 方向から北東 (千葉県・銚子) 方向の間をカバーしている.

2016 年は合計で 14 件の JC が撮影出来た. 図 1 はその一例である. 図 2 は 14 件の JC を発生させた積乱雲の位

置をプロットしたものである. 14 件のうち、1 つの積乱雲から複数回ジャンプする事例が 2 例 (それぞれ 2 回, 3 回ジャンプ; 合計 5 件) 含まれる.

可視カメラ観測は、雲の鉛直断面の発達過程を記録できる利点がある. 一方で、天候の影響を受けやすく、観測場所近傍の下層雲や降水で何も見えない日があったため、潜在的には観測数より多く発生していると考えられる.

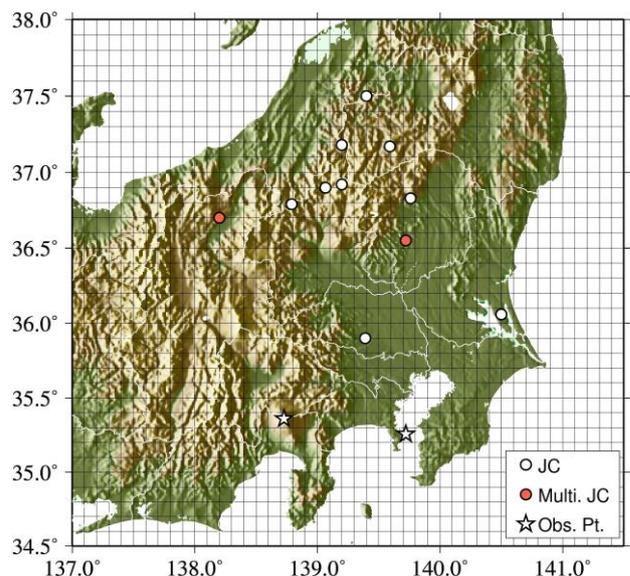


図 2. 2016 年 7-8 月における JC の発生位置. 図中のグリッドは経緯度座標, 星はカメラ観測点, 白丸は JC を発生させた積乱雲, 赤丸は複数の JC が見られた積乱雲の位置を示す.

3 解析

JC の形態について、観測点から見た JC (積乱雲) の位置までの距離と観測角度から、JC と anvil の高度・幅を算出した. まず、夜間に撮影した写真上の星の位置情報から (星図ソフト, ステラナビゲータ Ver.10, AstroArts 社を使用), 各ピクセルの方位角と仰角 (図 1 のグリッド線) を導出し、JC の方位角と仰角を求める. 次に、ひまわり 8 号で観測した赤外輝度温度分布 (観測波長 10.4 μm) を確認し、該当時刻・方向に存在する発達した積乱雲を特定して観測点との直線距離を求める. ただし、JC は光学的に薄く、同衛星では見えないため、最も対流が発達していると考えられる最低輝度温度点までの距離を使っている.

また、15 秒間隔のタイムラプス動画から JC の時間発展を追い、鉛直飛び出し速度と消えて見えなくなるまでの持

続時間を求めた。

さらに、JC 発生時の周囲の環境を調べるため、茨城県館野のラジオゾンデのデータを用いて、大気的气温・風の鉛直分布から圏界面高度、対流有効位置エネルギー (CAPE), anvil 上部の環境場の風の鉛直シアを求めた。

4 結果

全 14 件の JC の高さ (JC 頂上と anvil 頂上の高度差), 幅, 鉛直飛び出し速度, 持続時間の頻度分布を図 3 に示す。平均値 (標準偏差) はそれぞれ, 1.3 (0.5) km, 1.6 (0.5) km, 8.0 (4.0) m/s, 11 (5.5) 分である。

大気環境場の状態は, CAPE が 747.1 (589.6) J/kg, 最大値は 1384 J/kg, anvil 上部の環境場の風速の鉛直シアは -1.1 (3.9) m/s/km であった。負の値は, 上空ほど風速が小さいことを示す。

到達高度の平均は 15.1 km であった。事例ごとに, 算出した圏界面高度と JC の高度を比較すると 3 件が圏界面に達していた。

5 考察

図 3 に示す JC の物理量は, 事例によってばらつきがみられる。CAPE, 風速鉛直シアとの相関もなく, JC の発生条件や特徴を決定づける要因は観測結果からは分らなかった。

先行研究²⁾では, 3 次元非静力学雲モデルを使って, 米国中西部で 1981 年 8 月に発生した積乱雲をシミュレートしている。そこで再現された JC の事例と比べると, 本研究の事例は JC 発生時の周囲の大気の CAPE が低く, anvil 上部の環境場の風の鉛直シアが小さかった。

CAPE は上昇流の強さを表す。米国の事例は, この値が 2 倍ほど大きく, 積乱雲の規模が大きくな, 長寿のスーパーセルやマルチセルであった。一方, 本研究の事例は比較的小さなシングルセルの積乱雲であり, anvil の幅も小さかった。しかしながら, JC の高さ, 到達高度, 鉛直飛び出し速度, 持続時間は同程度の値を示したことから, 比較的弱い対流・小規模な積乱雲からも JC は発生すると考えられる。JC の幅も比較的小さな値であった。これは, JC の流れる方向によって, カメラ観測では必ずしも最大幅を観測できない点が影響していると考えられる。

anvil 上部の強い風の鉛直シアは, 重力波の碎波を促す重要な要因の 1 つと考えられている。本研究では環境場のその値が比較的小さかったが, ラジオゾンデの観測では JC 付近の状態を正確に測れない可能性がある。また, 環境場の風ではなく, anvil の移流速度 (積乱雲の見かけ上の移動速度) と環境場の風速の相対的なシアが効いている可能性もあると考えられる。

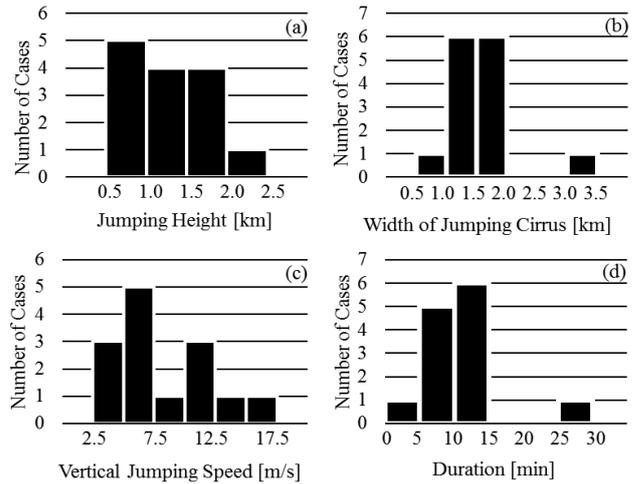


図 3. 全 14 件の JC の(a) 高さ, (b) 幅, (c) 鉛直飛び出し速度, (d) 持続時間の頻度分布

6 今後の展望

2017, 2018 年の夏季に同様の観測を行い, それぞれ 4, 12 件の JC を検出した。これらの事例に対しても同様の解析を行うとともに, 放射伝達計算とひまわり 8 号の観測からインバージョン法で JC の雲物理量を推定する予定である。

謝辞

本研究は, 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, 本研究の一部に九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を頂いた。

参考文献

- 1) Fujita, T. T., 1974: Overshooting thunderheads observed from ATS and Learjet. *SMRP Research Paper*, **117**, 1-29.
- 2) Wang, P. K., S. H. Su, Z. Charvát, J. Št'ástka, H. M. Lin, 2011: Cross Tropopause Transport of Water by Mid-Latitude Deep Convective Storms: A Review. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22**, 447-462.
- 3) Setvák, M., D. T. Lindsey, R. M. Rabin, P. K. Wang, A. Demeterová, 2008: Indication of water vapor transport into the lower stratosphere above midlatitude convective storms: Meteosat Second Generation satellite observations and radiative transfer model simulations. *Atmos. Res.*, **89**, 170-180.
- 4) Wang, P. K., 2003: Moisture plumes above thunderstorm anvils and their contributions to cross-tropopause transport of water vapor in midlatitudes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4194.

山岳大気エアロゾルの気候への影響に関する研究

三浦和彦¹, 森 樹大¹, 永野勝裕², 矢吹正教³, 加藤俊吾⁴, 和田龍一⁵, 大河内博⁶, 小林 拓⁷, 東 秀憲⁸, 鴨川仁⁹, 足立光司¹⁰, 岩本洋子¹¹, 青木一真¹², 櫻井達也¹³, 植松光夫¹⁴

1. 東京理科大学理, 2. 東京理科大学理工, 3. 京都大学, 4. 首都大学東京, 5. 帝京科学大学, 6. 早稲田大学, 7. 山梨大学, 8. 金沢大学, 9. 学芸大学, 10. 気象研, 11. 広島大学, 12. 富山大学, 13. 明星大学, 14. 東京大学

1. はじめに

エアロゾル粒子は太陽光を直接散乱・吸収することにより直接的に、また、雲凝結核となり雲のアルベド・寿命を変えることで間接的に気候に影響するが、いまだ理解の水準は低い(IPCC 2013)。地球規模の影響を評価する場合、自由対流圏エアロゾルの寄与が重要となる。富士山山頂は年間を通して自由対流圏に位置することが多い。そこで、新粒子生成、雲生成のメカニズムを調べるために、2006年から夏季だけではあるが、山頂と太郎坊においてサブミクロン粒子の粒径分布、ラドン、イオンを測定している。山頂では2010年から雲凝結核(CCN)濃度を、2013年からフォグモニターにより霧粒(雲粒)を測定している。2014年からは太郎坊でスカイラジオメータ、ライダーの観測を行った。また、2014年秋から太郎坊において通年観測をしている。2017年度までの解析結果は第11回成果報告会で報告した。(三浦ら, 2018)¹⁾

2018年度は、ラドン娘核種測定装置、雲凝結核計のトラブルのため、ラドン濃度、雲凝結核数濃度は欠測となったが、新たにネフェロメータ、PSAPを用いて散乱・吸収係数を計測した。ここでは、その後の解析結果について紹介する。

2. 方法と結果

2-1. ラドン濃度

2017年夏季の富士山におけるラドン濃度に対し、測定値とラドン輸送モデルシミュレーション結果を比較した結果、汚染の由来を4つに分類できた。その一つとして、日中から夜間にかけてラドン濃度が上昇し続けるパターンがあった。WRFによる1kmメッシュのシミュレーション結果と後方流跡線から、日中は谷風による局地由来、日没後は中部山岳などの国内由来の影響が示唆された。そして、3つの例の共通項として本州全体が高気圧に覆われることが挙げられ、国内・局地気塊が山頂に連続して到達する条件が示唆された。(横山ら, 2019)²⁾

2-2. 新粒子生成

粒径10~5000 nmの大気エアロゾルの乾燥粒子の個数粒径分布を走査型移動度粒径測定器(SMPS)と光散乱式粒子計数器(OPC)を用いて測定した。得られた粒径分布をもとに、核生成モードのエアロゾルが1時間以上にわたって増加し、

粒径が成長する時間をNPFイベント(以下、イベント)と定義した。イベントの発生しやすさを見積もるため、Condensation Sink(CS)を粒径分布から求めた。

富士山頂における全イベントは、2011年から2018年の全観測期間256日中195回観測された。日中は8時、夜間は20~21時にイベント観測数のピークを持つことがわかった。またクラス分類を行った結果、Class Iが一番多く、日中イベントではClass I、夜間イベントではClass IIがそれぞれ多い結果となった。

GRは全195回のイベント中40回で有効な値を示し、1.7~14.7 nm/hとなった。また、夜間より日中のGRの値が約1.3倍大きいことがわかった。GRを用いたNPF発生時刻の推定を行ったところ、日中(80%)と夜間(20%)の両方でNPFが発生していることが示唆された。この結果から光化学反応と暗反応の両方でNPFが発生している可能性があることが示唆された(図1)。(五十嵐ら, 2019)³⁾

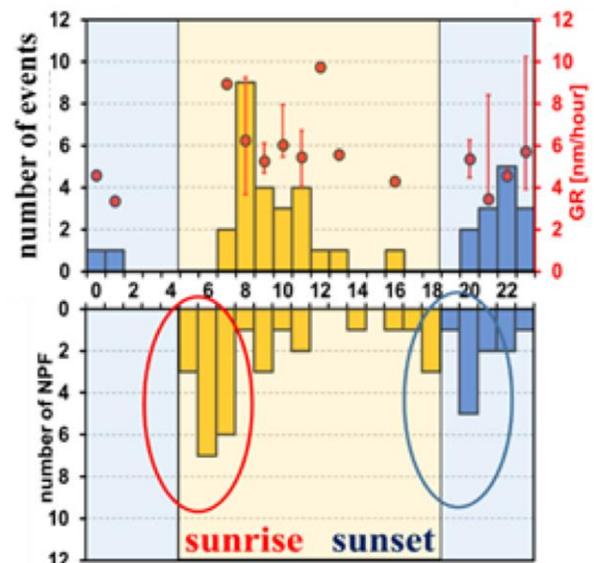


図1. 2011~2018年NPF発生時刻の推定結果
(上図:GRが算出できたイベントの時刻別発生頻度とGR)
(下図:GRから逆算したNPF発生時刻の推定結果)³⁾

2014年から2018年での富士山麓太郎坊での新粒子生成の経年変化の解析を行った。その結果、2017年以降NPFイベントは極端に減少していることがわかった。御殿場市における無機エアロゾルの前駆気体濃度には変化がない

一方で、有機エアロゾルの前駆気体である BVOC 濃度は日中、夜間共にイベントとの相関が見られた。(萩原ら, 2019)⁴⁾

2-3. 個別粒子分析

2018 年夏に山頂と太郎坊においてインパクターで捕集した個別粒子を透過型電子顕微鏡とエネルギー分散型 X 線分析器を用いて、特に黒色炭素粒子(BC)に着目して分析した。その結果、(a)太郎坊では山頂に比べて、BC と混合した粒子が多いことが分かった。(b) 太郎坊における BC の混合状態を図1のように分類したところ、太郎坊では Attachment type が約 80%以上を占めていた。(c) 後方流跡線解析によって、日本上空通過時の高度によって BC との混合状態に違いがみられた可能性が示唆された。(市川ら, 2019)⁵⁾

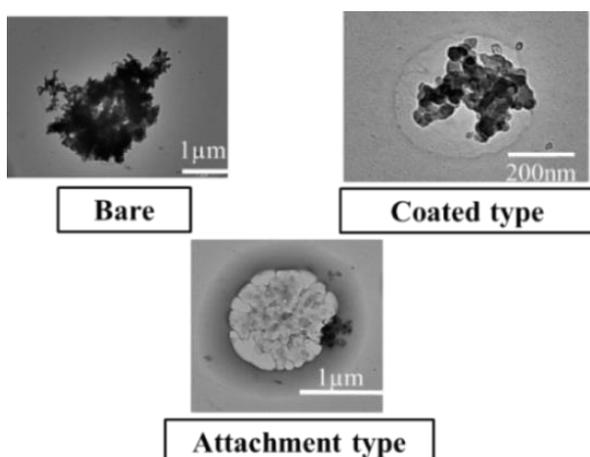


図2 BC 混合粒子の例⁵⁾

2-4. エアロゾル粒子の光学特性

富士山頂及び山麓で OPC とネフェロメータ, PSAP を用いてエアロゾル粒子数濃度, 散乱・吸収係数を計測した。次に、得られた観測値から体積粒径分布, 単一散乱アルベド(SSA)を推定するプログラムを開発した。推定する化学組成は水溶性粒子, すず粒子, 海塩粒子, 鉱物粒子の 4 種類とし、その結果、山頂では水溶性が 78%, すず粒子が 10%を占め、山麓では水溶性が 84%, すず粒子が 12%を占めていた。また、推定された SSA は山頂では 0.71~0.96 で平均値は 0.89 程度、山麓では 0.81~0.97 で平均値は 0.92 程度であった。

図3に山頂と山麓における消散係数と SSA を表す。消散係数の時間変化から、21日山頂における SSA の低下(0.91→0.85)は、すず粒子の消散係数の増大の影響が示唆された。また山麓においては 20日夜から 21日午前にかけての SSA の上昇(0.87→0.93)は水溶性粒子の消散係数の増大の可能性が示唆された。(乾ら, 2019)⁶⁾

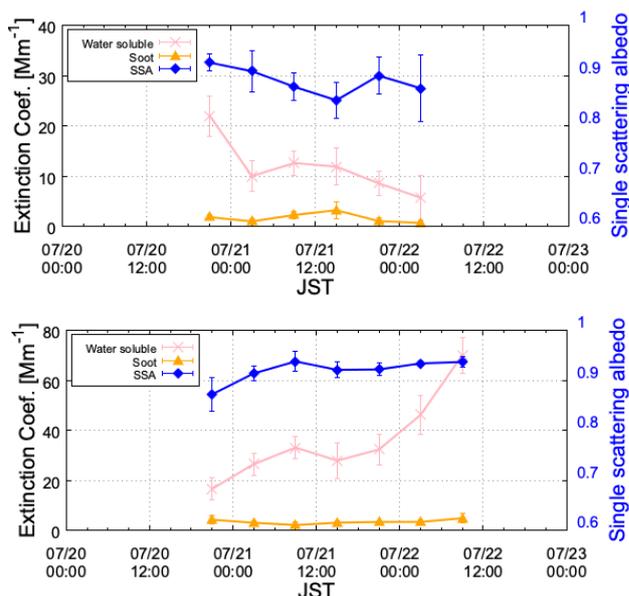


図3 山頂(上)と山麓(下)における消散係数と SSA⁶⁾

謝辞

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。本研究の一部は、科研費基盤研究 C (22510019, 25340017) (2010~2015 年度), 名古屋大学太陽地球環境研究所「地上ネットワーク観測大型共同研究」(2013~2016 年度), 東京理科大学山岳大気研究部門・大気科学研究部門活動経費・活動補助費(2011~2018 年度), 東京理科大学特定研究助成金(2013~2014, 2016~2017 年度), 京都大学生存圏ミッション研究(2016 年度), 公益財団法人栗井英朗環境財団奨励金(2016 年度)の助成により行われた。

参考文献

- 1) 三浦和彦ら, 第 11 回成果報告会要旨集, 12-13, 2018
- 2) 横山慎太郎ら, 第 12 回成果報告会要旨集, 2019
- 3) 五十嵐博己ら, 第 12 回成果報告会要旨集, 2019
- 4) 萩原大樹ら, 第 12 回成果報告会要旨集, 2019
- 5) 市毛友彬, 第 12 回成果報告会要旨集, 2019
- 6) 乾 諒介, 第 12 回成果報告会要旨集, 2019

富士山頂の雲：レアアースを使って越境大気汚染の影響を調べる

○大力充雄¹, 大河内博¹, 米持真一², 島田幸治郎¹, 皆巳幸也³, 勝見尚也³, 三浦和彦⁴, 戸田敬⁵, 竹内政樹⁶, 加藤俊吾⁷, 和田龍一⁸

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

1. 越境大気汚染は“受動喫煙”

経済発展が著しいアジア諸国では環境対策が遅れており、様々な大気汚染物質が排出されています。最近でも PM2.5 による大気汚染がインド、モンゴル、タイ、韓国などで盛んに報道されています。日本は地理的には大陸の東端に位置しています。上空では偏西風が卓越していますので、大陸から排出された大気汚染物質の影響を必然的に受けます。他国から排出された汚染物質が原因で生じる大気汚染を、越境大気汚染といいます。日本国内の大気汚染物質排出量は減少していますが、国境を越えて大気汚染物質が運ばれてくれば、日本の自然環境を守ることはできません。越境大気汚染は“受動喫煙”のようにやっかいです。PM2.5 をめぐって、韓国と中国では国際問題にまで発展しています。

2. 富士山は巨大大気観測タワー

富士山は日本列島のほぼ中央部に位置しています。世界最大のメガシティである首都圏から 100 km しか離れていませんが、自由対流圏にある富士山頂では首都圏から排出された大気汚染の影響を受けません。自由対流圏は高度約 2000 m 以上の大気層であり、地上の摩擦の影響を受けないので風が強く、地上から排出された大気汚染物質が運ばれにくいので綺麗です。したがって、富士山頂で空気を調べれば、綺麗な空気の性質を調べることができます。

中国を中心として、アジアは世界最大の大気汚染物質排出源です。大規模な低気圧などの発達により、地上で放出された大気汚染物質が自由対流圏まで輸送されると、地球規模の大気汚染を引き起こします。富士山頂では強い西風が卓越していますので、このような地球規模汚染をいち早く検知することができます。

3. 雲はガスでも、純水でもありません

登山者は、雲がかかると「ガスってきた」と言いますが、雲はガスではありません。雲は数 - 50 μm 程度(平均: 10 - 20 μm) の小さな水滴です。雲は太陽光を反射したり、地球放射を吸収するので、地球の気温に影響を及ぼします。また、雨をもたらず雲は 10% 程度ですが、重要な水資源です。さらに、雲はエアロゾルを核として生成して様々な物質を溶かし出し、水溶性ガスを吸収して溶解します。すなわち、雲は純水では

なく、高濃度溶液です。雲の化学性状を調べれば大気汚染状況が分かります。また、雲に含まれる化学物質により雲粒の大きさが変化し、雲の寿命や太陽光の反射率が変化します。自由対流圏に浮かぶ雲の化学性状に関する研究は、世界的にも限られています。

4. レアアースと何か？

金属元素は、使用量と自然界での存在量からベースメタル(卑金属)、貴金属、レアメタルに分類されています。ベースメタルは鉄、銅、亜鉛、鉛、アルミニウムなど社会で大量に使用され、生産量が多い金属元素であり、貴金属は金、銀、白金、パラジウムなどの化合物を作りやすく、希少性の高い金属です。レアメタルは、地殻中の存在量が少ないか、採掘と精錬コストが高いなどの理由により、流通・使用量が少ない非鉄金属をさします。レアメタルのうち、スカンジウム、イットリウム、ランタンなどの 17 元素は一般にレアアース(希土類元素)と呼ばれています。現在、レアアースの生産量は中国が世界の 8 割を占めていますので、大気中レアアース濃度の増加は中国からの汚染空気の輸送を示すかもしれません。

5. 雲水中レアアース分析は世界初！

2018 年 7 月 18 日～8 月 23 日に富士山頂で雲水を採取し、レアアースを含む金属 57 元素を測定しました。雲水中レアアースの分析は世界で初めてです。図 1 に雲水中レアアース濃度を示しますが、セリウム(Ce)、イットリウム(Y)、ネオジウム(Nd)、ランタン(La)が主成分であることが分かりました。空気塊別に調べると、海洋由来ではレアアース濃度は低く、大陸北部由来で高濃度であり、海洋の 50 倍以上でした。

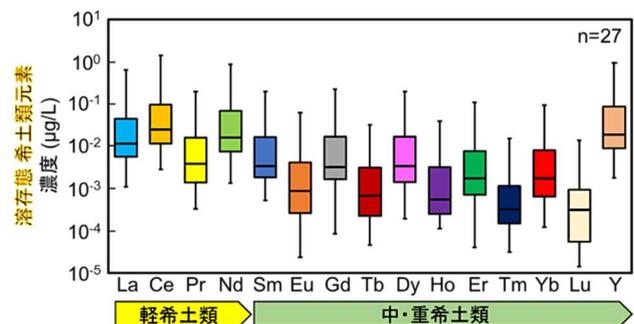


図 1 2018 年に富士山頂で採取した雲水中レアアース濃度

富士山頂で連続採取した PM₁ による人為起源粒子の評価

○米持真一¹, 堀井勇一¹, 畠山史郎¹, 小西智也², 崎山浩太², 大河内博³, Ki-ho Lee⁴, Lu Senlin⁵
 1. 埼玉県環境科学国際センター, 2. 早稲田大学, 3. 早稲田大学理工学術院, 4. 韓国済州大学, 5. 中国上海大学

1. はじめに

我が国の PM_{2.5} 汚染には改善傾向が見られ, 2016 年度の環境基準達成率は, 一般局, 自排局ともに 90% 近くまで改善したが, 100% 基準達成と安定的な維持を目指す上では, 一層の濃度低減が望まれる. また, 今後の気候変動や連動する社会変化が大気環境に及ぼす影響は不明な部分が多く, 地上と上空の大気粒子を継続して調べることは重要である. このような中, 2018 年夏季の関東地方は, 観測史上最も早い 6 月 29 日に梅雨明けし, 内陸では連日の猛暑に見舞われた.

大気エアロゾルは, 粒径 2 μm を境に粗大粒子と微小粒子に大別され, PM_{2.5} には粗大粒子の一部が含まれる. 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, 我々は 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.

また, 2015 年からは, 富士山測候所に PM_{2.5} サンプラーを設置し, 夏季の 1 ヶ月間 PM_{2.5} を採取して化学成分を調べて

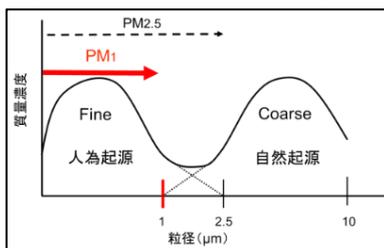


図 1 大気粒子の粒径分布と PM₁

きたが, 山頂の PM_{2.5} は富士山表土に由来すると考えられる成分を多く含んでいた. そこで 2018 年は PM₁ を対象とした観測を行うこととした.

2. 観測方法

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 PM_{2.5} WINS-impactor から PM₁ Sharp cut cyclone (SCC) に換えて PM₁ を採取した. 期間は 2018 年 7 月 24 日～8 月 21 日の 29 日間とし, PTFE フィルター (Teflo, Pall) を用い, 深夜 0 時にフィルター交換を行った. 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. なお, 埼玉県加須市における PM_{2.5} は 1 日単位のフィルター捕集, PM₁ は PM714 (紀本電子工業) を用いた.

3. 結果

図 2 に富士山頂および埼玉県加須市の PM₁ と PM_{2.5} の変化を示す. 富士山頂の PM₁ は $1.9 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり 7 月 24 日のほか 8 月 1 日～6 日にやや高めで推移した. 図示していないが, SO₄²⁻ が PM₁ の 4～6 割を占めていた. この期間は埼玉県加須の PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ も上昇した. 地上の O₃ 濃度も高めで

推移し, 8 月 1 日及び 4 日は埼玉県内で光化学スモッグ注意情報も発令され, SO₂ の変換が促進されたものと考えられる.

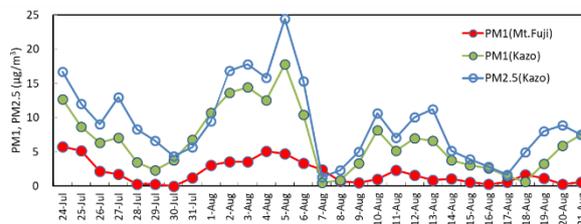


図 2 富士山頂および埼玉県加須の PM₁ 濃度

富士山頂の PM₁ に含まれる無機元素の濃縮係数 (EF 値) を図 3 に示す. また, 2015 年に日単位採取した PM_{2.5} 中無機元素¹⁾ の EF 値も示した. なお, 土壌の元素比は, 2017 年に許可を得て採取した富士山表土の分析値を用いた.

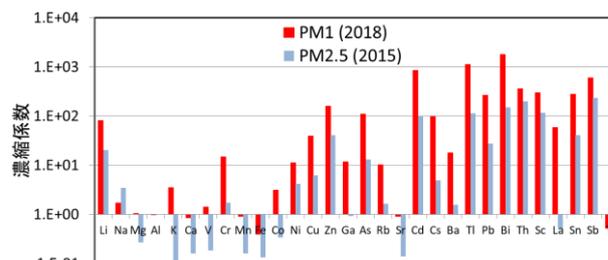


図 3 PM₁ と PM_{2.5} 中の無機元素の濃縮係数 (期間平均値)

図中の元素には, 大気中濃度や元素比が非常に低い元素も含まれるが, 人為起源と考えられる元素の EF 値は, PM₁ の方が PM_{2.5} より 2～100 倍高かった. また, 一般に自然起源と考えられる Mg, Ca, Fe, Sr, Ti などは理論値である 1 に近い値となり, PM₁ の有効性が示された.

4. おわりに

PM₁ の有効性は示すことができたが, 中国等における PM₁ 中の無機元素の情報は少ない. 並行して実施している中・韓との PM₁ 同時観測から得た情報を活用して解析を進めたい.

謝辞

本研究は科研費(17K00535)および埼玉県大気環境課 PM_{2.5} 対策事業により実施された.

参考文献

- 1) 米持真一, 大河内博, 廣川諒祐, 小西智也, 富士山頂と埼玉加須を主とした PM_{2.5} 同時観測から評価した 2015 年夏季の関東地域の PM_{2.5} 濃度上昇要因, 大気環境学会誌, **53**, 144-152 (2018).

夏季富士山頂で観測された大気中高濃度水銀の起源解析

永淵 修¹, 中澤 暦¹, 篠塚賢一¹, 木下 弾², 菱田尚子², 西田友規³, 加藤俊吾⁴

1.福岡工業大学, 2.日本インスツルメンツ(株), 3.滋賀県立大学大学院, 4.首都大学東京

1. はじめに

国連環境計画(UNEP)は2005年に水銀に関するDecision 23/9IVを採択し、各国政府機関に対して環境への水銀放出量と健康リスクの削減を求めた。その要求を受け、2006年には日本を含めた6カ国で水銀の大気輸送に関する研究分野のGlobal Partnershipが発足した。これは水銀の長距離輸送モデルの研究開発や、極地や遠隔地並びに高地及び山岳における大気中の水銀濃度などに関する研究を促すものであった。一般的に地上から高度約10,000 mまでを対流圏と呼び、高度1,000~2,000 m以下の大気層(大気境界層)とそれ以上の高度である自由対流圏に分けられる。自由対流圏は、地表との摩擦がほとんどなく地球規模の長距離輸送を観測するのに適している。また、自由対流圏と大気境界層の界面付近(気圧850hPa付近)の層は物質が輸送されやすい。実際、アメリカの研究では、アジアからのガス状および粒子状の汚染物質の大陸間輸送が北米の西海岸の大気組成に大きな影響を与えていることが報告されている。また、日本へも中国大陸の汚染物質の輸送が1990年代から報告されている。大気中水銀に関しても大陸からの輸送が報告されている。したがって、自由対流圏における大気中水銀の動態および輸送・沈着の過程を包括した大気中水銀のモニタリング体制を整えることは重要である。

本研究では、2013年~2015年に自由対流圏に属する富士山測候所(Mount Fuji Research Station, MFRS)において、夏季の総ガス態水銀(TGM)、オゾン(O₃)、二酸化硫黄(SO₂)の連続観測を行い、気象データ(ラジオゾンデデータを含む)とBack Trajectory(BT)を用いてTGMの動態を検討した。なお、ここでは紙面の関係上2013年7月と8月における高濃度時の解析結果を示す。

2. 研究方法

大気中水銀の観測は、富士山頂(3,776 m a.s.l.)にあるMFRSで行った。大気中水銀の連続観測に用いた機器は、2013, 2014年はMercury Ultra Tracker UT-3000(Mercury Instruments社製)、2015年はAM-5(日本インスツルメンツ社製)である。環境大気はインレットの外(重要)から室内に導入し、UT-3000およびAM-5に接続し連続観測を行った。測定方法は、UT-3000はatomic absorption spectroscopy(AAS)で、検出器は紫外線吸収法である。一方、AM-5はcold vapor atomic fluorescence spectroscopy(CVAFS)である。

MNOへ到達する気塊の輸送経路の推定には、アメリカ海洋大気局(NOAA: National Oceanic Atmospheric Administration)から提供されているHYSPLIT-4(January

2017 Revision)(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)モデルを使用した。HYSPLIT-4はR(version 3.5.1)のオープンソースのパッケージであるopenair¹⁾を用いて解析を行った。遡上時間は5日前(121時間前)、時間分解能は1時間とし計算を行った。解析を行った期間と場所は2013年~2015年の調査期間とMFRSである。MFRSを中心とした0.5°×0.5°のグリッドで25地点解析、さらに、昼間のMFRSへの上昇気流などの影響を評価するため、地表付近(100 m a.s.l.)から山頂(5,000 m a.s.l.)までの間で100 m毎のBT解析を行った(合計1250のBT)。BT解析から得られた1時間毎の座標から、汚染地域の通過時間・高度を計算するために、0.5°×0.5°グリッドの水銀排出量の空間データ(固定燃料水銀、産業資源水銀の排出、産業廃棄物)をもつArctic Monitoring and Assessment Programme(AMAP)をもとにGIS(Geological Information system)を用いて、MFRSに到達した気塊が汚染源の3,000 m以下の高度を通過した時に取り込むと仮定した水銀フラックス量の計算を行なった。

MFRSでは、バイサラの総合気象計による観測を行った。高層気象データによる鉛直分布は、石川県輪島測候所、和歌山県潮岬測候所、東京都八丈島測候所、島根県松江測候所および茨城県館野測候所で観測されているラジオゾンデデータを用いた。

3. 結果および考察

図1に2013年夏季のTGM, WV, O₃および気温の1時間間値の変動を示す。

TGMの濃度が北半球のバックグラウンド値(1.5~1.7 ng/m³)を超過しているのは、7月24日~29日と8月19日~20日である。この高濃度イベントを#1と#2として解析する。

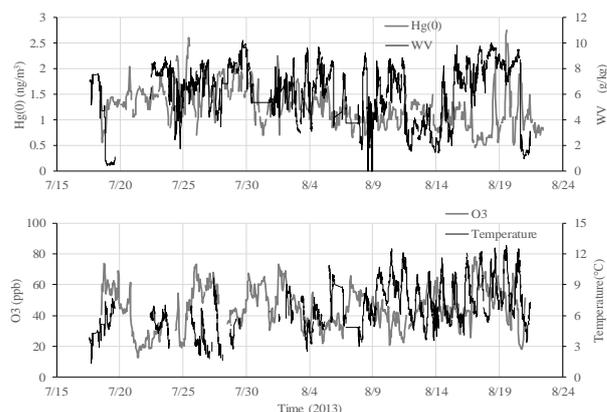


図1 2013年夏季のTGM, WV, O₃および気温の1時間間値

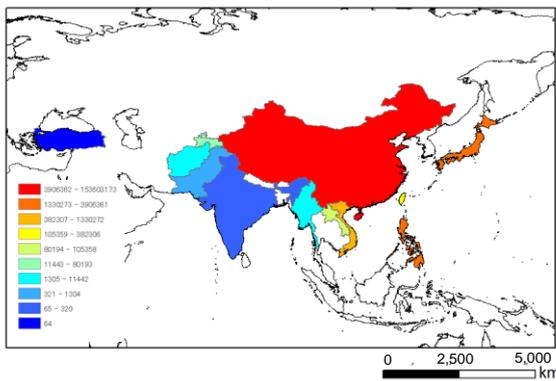


図2 MFRS に到達した Hg 積算排出量の国別の割合

#1 は、BT の解析結果から中国大陸を通過した気塊が到達したものであり、特に7月24日はWVの値も低くdryな気塊が高高度から降下したものと考えられる。8月19日～20日のTGMの高濃度は後記するが、8月18日16:31に桜島が噴火しており、BTの解析結果からもこの噴火の影響を示唆している。

2013年の調査期間中におけるMFRSに到達したHg積算排出量(フラックス量)の国別の結果を図2に示す。

図2の暖色はHgフラックス量が多いことを示している。国別でみると上位9か国で累積フラックス量の99%を占めており、Chinaが92%、Philippinesが2.3%、Japanが1.9%であり、South Korea, Vietnam, Thailand, Cambodia, North Korea, Taiwanと続いている。なお、フラックス量は低いがMFRSから最も遠い国では、Turkeyを通過した気塊も到達している。

次にフラックス量が95%を占める上位3か国を対象として国別寄与解析を行った。図3に富士山に到達した高度別のHgフラックス量を示す。7月24日からのMFRSでの高濃度は中国からの影響を示唆しており、日本からの影響は富士山の低標高に集中していることがわかる。また、8月19日～20日の高濃度は日本からの影響であることを示唆している。このイベントの解析では、桜島にもMFRSと同様のbox作成し、100mから10,000m(噴煙高度が5,000mのため)の高度でTrajectory解析を行った。図4は、桜島噴火後に富士山Box(100m毎)に到達したtrajectoryのn数を示す。この結果から8月19～20日のMFRSでのTGMの高濃度は桜島から排出された水銀であると考えられる。しかし、Katoら²⁾のSO₂の解析結果と比べるとTGMの方が早くMFRSに到達しており、火山ガスとして爆発前にTGMが高濃度になっていた可能性も考えられる。

4. まとめ

- ・MFRSに到達するTGMは中国大陸からの影響が大きい。しかし、国内起源のTGMも富士山の低標高には到達している可能性がある。

- ・火山の噴火イベントでは、SO₂とTGM等の火山ガス濃度

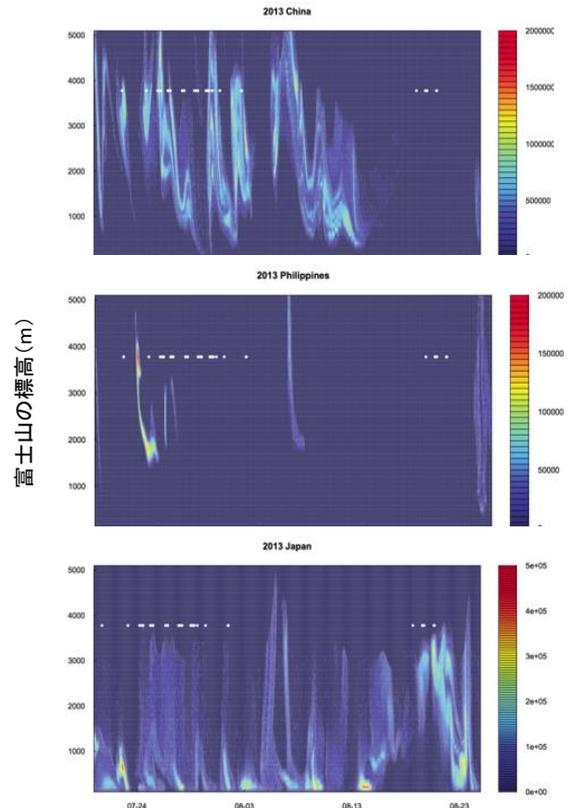


図3 中国の水銀排出源を通過した気塊(Hgフラックス込)が富士山のある緯度経度に到達したときの高度、白のドットは富士山頂で観測したTGMが北半球のバックグラウンド値(1.7 ng/m³)を超過した日時

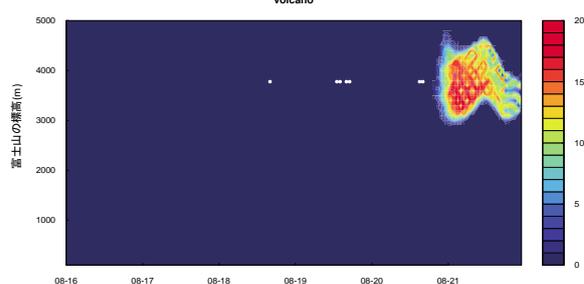


図4 桜島boxを通過した気塊が富士山boxに到達した標高と通過trajectoryのn回数(Back Trajectory)

が上昇するが、TGMは噴火イベント前から高濃度ガスを排出している可能性があり、実際にFT解析で富士山の高標高に到達している。

参考文献

- 1) King's College London (2015) The openair manual open-source tools for analyzing air pollution data, version 28th January 2015.
- 2) S. Kato et al (2015). Atmospheric CO, O₃ and SO₂ Measurements at the Summit of Mt. Fuji during the Summer of 2013, *Aerosol and Air Quality Research*, **16**, 2368-23.

雲の核としてはたらく微生物の探索:2018 年トライアル観測

村田浩太郎¹, 鴨川仁¹

1. 東京学芸大学

1. はじめに

雲は水滴(雲粒)や氷の粒(氷晶)から成るが、-38-0°Cの温度領域での氷晶形成には核となる粒子、すなわち、氷晶核が必要である。空气中に多数存在する代表的氷晶核は鉱物ダストであり、-12°C付近で水の凍結を引き起こす。一方、最も強力な氷晶核は微生物などの生物粒子であり、最高-2°C付近で凍結を引き起こす。雲にとって氷晶形成は放射特性や降水過程、寿命を決定づける主要因の一つであるため、上空に存在する微生物・生物粒子の氷晶核としてはたらしき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・雲存在高度における浮遊微生物情報の収集とその生物氷晶核としての評価を将来的に行うことを目指して、まずはトライアル観測として富士山頂での試験的採取、培養(細菌とかび、酵母)、微生物組成の遺伝子解析(今回は細菌のみ)を試みた。

2. 方法

2018年7月14日と16日に、3号庁舎外にポンプとフィルタを設置し、0.2 μm 孔径ポリカーボネート製フィルター上に空气中浮遊粒子を吸引採取した。採取流量は約4 Lmin⁻¹で、採取時間は1時間20分~8時間であった。合計10個の試料を取得した。また、採取中細菌用およびかび・酵母用シート状培地を野外に2分~10分程度放置し、落下菌も採取した。フィルターは分析まで冷蔵した。

フィルターは2分割し、半分は培養、半分は遺伝子解析に使用した。培養は、5 mm 角に裁断したフィルターを2時間振とうしてリン酸緩衝生理食塩水に洗い出し、試料懸濁液を調製した。細菌 R2A 寒天培地で30°C、かび・酵母はポテトデキストロス寒天培地で25°Cにて培養を試みた。遺伝子解析は、解析に必要なDNA量を確保するために10個のサンプルを4個にプールした。今回は16S rRNA 遺伝子のv4領域を標的とし、細菌群の組成を解析した。遺伝子抽出とPCR およびシーケンシング(Illumina Miseq)は株式会社ファスマックに外部委託した。得られた配列データは次世代シーケンスによる微生物解析ツールであるQIIME 2のパイプラインにより解析した。

3. 結果と考察

採取したフィルターからはいずれの微生物も培養することができなかった。理由として、フィルター吸引時のストレスにより微生物が培養不能になったことと、分析までの保管期間が約3ヶ月と長かったためにその間に培養不能になったことが

あげられる。生きた微生物が得られなかった一方で、細菌の遺伝子解析は実施することができた。得られた細菌組成の一例を図1に示す。7月14日午後~16日早朝までの門の分類群での組成の時間変化を示している。観測期間で組成の大きな変化はなく、Proteobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes, Actinobacteria 門によって構成されていた。これら4種類に加え、OD1, Planctomycetes, Verrucomicrobia, GN02, Gemmatimonadetes 門が期間を通してすべての試料から見つかった。氷晶核としてはたらくことが報告されている細菌はProteobacteria 門(とくにGamma-proteobacteria 綱)に属するものが多いため、この分類群を本研究の解析領域の限界である科のレベルまで分類したところ、過去に生物氷晶核として報告されている種が属するEnteobacteriaceae やPseudomonadaceae, Xanthomonadaceae 科が試料中に存在していた。今後も観測を継続していき、氷晶核濃度との対応の検討に加え、総観気象や山谷風による変動も見ていく必要がある。また、氷晶核としての能力の評価のために分離培養を成功させることが今後の課題である。

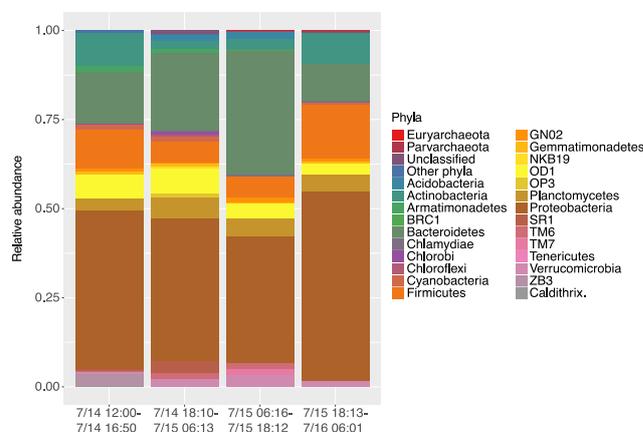


図1. 山頂における空气中浮遊細菌の門の組成変化

フィルター試料からは微生物が培養できなかったが、野外に設置したシート状培地からは糸状菌と酵母とみられる微生物を培養することができた。現在凍結核としてはたらしきを調査しており、本発表にて初期結果を紹介する予定である。これらの菌類が人為的汚染(コンタミネーション)ではないのかはさらに検証を要するが、少なくとも次回以降の観測におけるかびや酵母などの菌類の組成解析の必要性が確認できたといえる。

10 年間の富士山頂での大気中 CO₂ 濃度観測で明らかにしたこと

野村渉平, 向井人史
国立環境研究所

1. はじめに

1980-1981 年と 2002-2004 年にそれぞれ東北大学と気象研究所により富士山頂で大気中二酸化炭素(CO₂)濃度の観測が実施された。その結果、富士山頂の CO₂ 濃度は、東アジア域のバックグラウンド濃度であることが示唆された。しかし上記の観測で使用された富士山測候所に定常的な電力の供給が停止され、それに伴い 2004 年に富士山頂の CO₂ 濃度観測が中断された。

そこで富士山頂での CO₂ 濃度観測の再開を目的に、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国立環境研究所が開発した。そして 2009 年に富士山測候所にそのシステムを設置し、富士山頂の CO₂ 濃度観測を開始した。

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 年間で明らかとなったことを報告する。

2. 気温と電圧

図 1 に CO₂ 濃度検出部を収納した保温庫内と富士山頂の気温および CO₂ 濃度観測で使用したバッテリー 100 個の電圧を示した。

保温庫内の気温は富士山頂の気温に連動していたが、両者の気温差は常に 20°C 程度であった。これまで保温庫内の気温が氷点下を下回った日数は 13 日間のみであった。

観測期間に、電圧低下に伴う CO₂ 計による CO₂ 濃度観測の中断は生じなかった。2016-2017 年にバッテリーを新規のものとの交換した結果、夏期の充電直前の電圧が高まった。

3. CO₂ 濃度

図 2 に富士山頂と CONTRAIL project による航空機により測定された富士山頂付近の CO₂ 濃度、富士山頂とマウナロアの CO₂ 濃度および CO₂ 濃度増加率と ENSO Index を示した。

富士山頂の CO₂ 濃度は富士山頂付近で航空機により測定された CO₂ 濃度とほぼ同じ値であった。すなわち富士山頂は地上でありながら、年間を通して自由対流圏に位置することが明らかとなった。

また富士山頂の 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であった。

これまで両地点の濃度差は観測を開始した 2009 年から 2014 年まで拡大傾向にあったが、近年は両地点の濃度差は、縮小傾向にあった。この推移は中国から人為的に排出される CO₂ 総量と同様の推移であった。したがって両地点の濃度差を長期間モニタリングすることにより、アジア大陸周辺の炭素循環の変化を検証できることが明らかとなった。

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じであり、さらに ENSO Index と同様であった。したがって富士山頂の CO₂ 濃度はエルニーニョ・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。

4. フラスコサンプリング

図 3 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 濃度およびマウナロアでのフラスコサンプリング結果の比較を示した。

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 濃度より 0.07 ppm 高かった。このことから富士山頂で実施した空気試料のフラスコでの長期保管中に試料がリークしなかったと考えられた。

富士山頂の CH₄・CO・SF₆ 濃度は、マウナロアのそれらの濃度より高かった。これはアジア域における CH₄・CO・SF₆ の強い排出源の影響を受けたためであった。

一方、富士山頂で夏期に採取された空気試料中の δ¹⁸O-CO₂ はマウナロアのそれより軽かった。これは空気がフラスコ内で保管されている際に同位体変化が生じたためだと考えられた。

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。

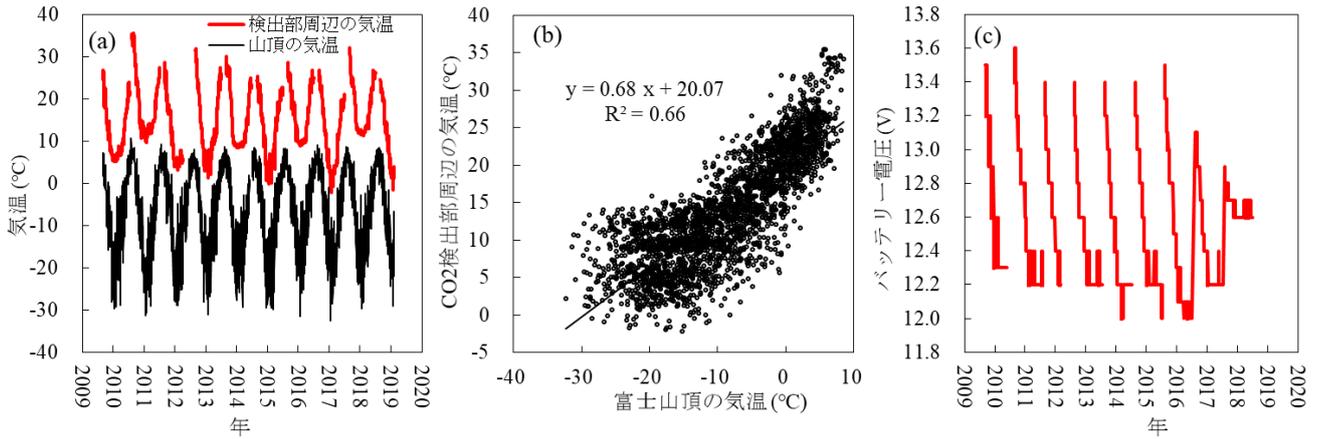


図1. (a)CO₂濃度検出部周辺の気温と山頂の気温および(b)それらの散布図ならびに(c)CO₂濃度観測システムのバッテリー100個の総電圧値

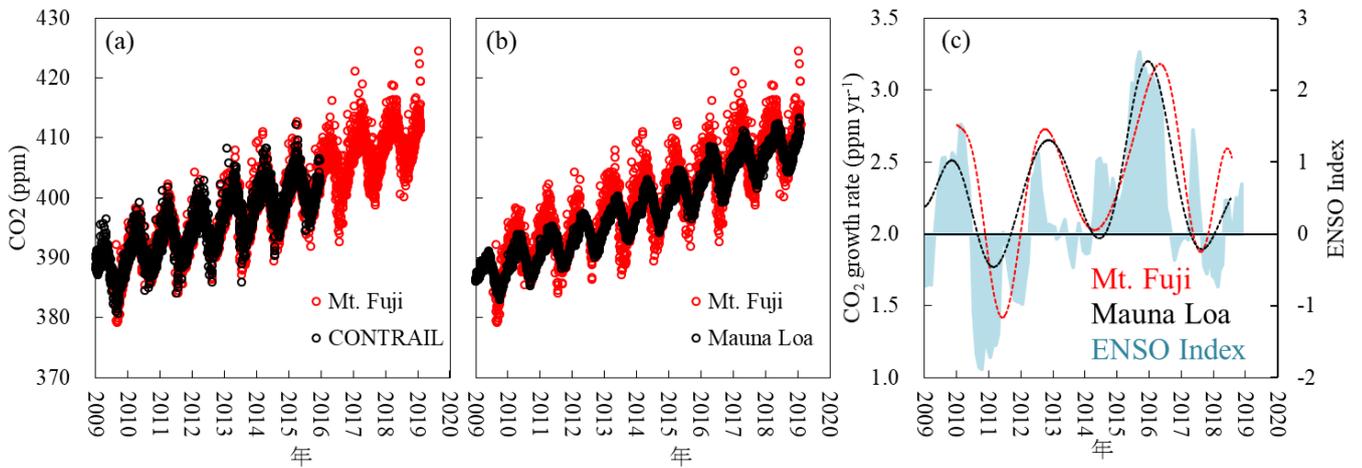


図2. (a) 富士山頂と CONTRAIL project による航空機により測定された富士山頂付近の CO₂ 濃度および(b)富士山頂とマウナロアの CO₂ 濃度ならびに(c)富士山頂とマウナロアの CO₂ 濃度増加率と ENSO Index

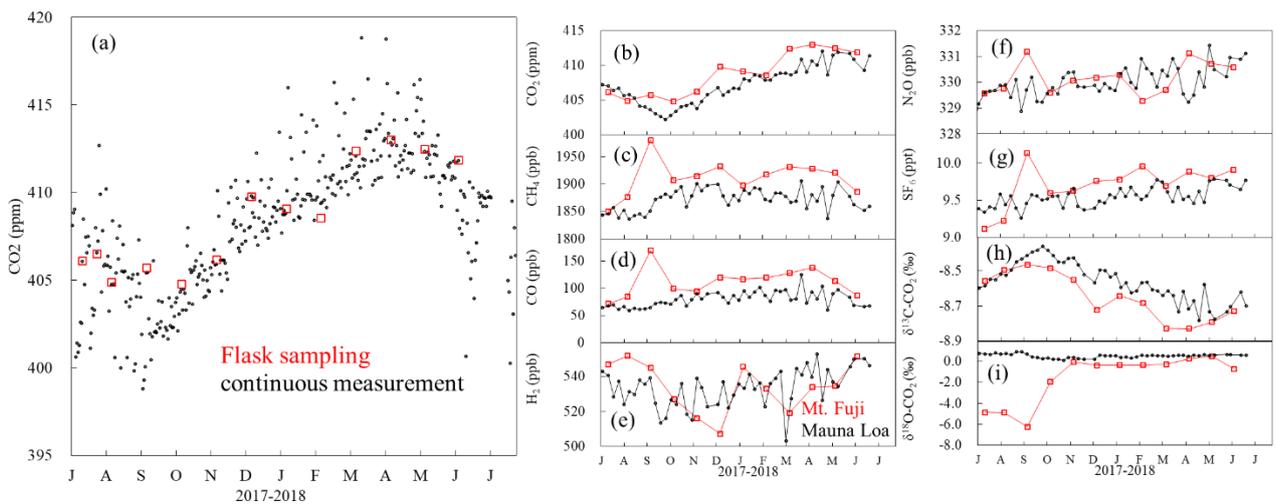


図3. (a) 富士山頂での毎月のフラスコサンプリングで得られた空気試料の CO₂ 濃度と CO₂ 濃度観測システムにより測定された富士山頂大気中 CO₂ 濃度ならびに(b)-(i)富士山頂とマウナロアのフラスコサンプリングでの温室効果ガス濃度と炭素同位体比

富士山頂での火山性ガスの越冬観測を目指した取り組み

加藤俊吾¹, 高橋智樹¹, 千島峻¹, 三浦和彦², 大河内博³, 鴨川仁⁴

1. 首都大学東京, 2. 東京理科大学, 3. 早稲田大学, 4. 東京学芸大学

1. はじめに

高度 3776m の富士山頂において遠方から長距離輸送される汚染大気塊を捉えるのに適している。そのため、これまで夏季の富士山頂において、二酸化硫黄(SO₂)などの大気汚染物質の観測を行ってきた。SO₂は主に石炭燃焼から放出されるが、この数年の夏季の富士山頂の観測から、石炭燃焼由来ではなく国内の火山活動により放出される火山性ガスが検出される事例が多数みられた。また、富士山自体も火山であり、近年の平穏な状況からいつ活発な状態になってもおかしくない。そのため、富士山頂において火山性ガスである SO₂ 濃度がリアルタイムで一年を通して分かるようになれば、防災に役だてることができる。しかし、大気微量成分の観測には高価で大型の計測装置が必要であり、消費電力も大きいので、富士山頂で商用電源が利用できない期間(夏季以外)での測定は困難である。そこで本研究では、電力消費の少ない 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。SO₂ センサーの性能評価のため、実験室内における標準ガスを用いた SO₂ 計との比較測定実験では数 ppb までの低濃度の SO₂ の検出が可能であった。しかし、実際の大気の観測においては温度などの影響を受けて SO₂ センサーの出力値が数十 ppb 変動をしてしまった。そのため、低濃度領域での SO₂ の変動の測定は不十分であることが分かった。

3. 実大気での SO₂ の検出(大涌谷での観測)

実際の大気での火山性ガスを検出できるか確認するため、箱根大涌谷において大気観測テストをおこなった。乾電池で SO₂ センサーやデータロガーを動作させるようにした。火山性ガスの影響を受けた地点では数百 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. 富士山頂での夏季の HALKA の通信テスト

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た通信機能を備えたデータロガー(HALKA, X-Ability 社)を使用し

た。2018 年夏の富士山頂において、SO₂ センサー(乾電池駆動)での大気測定結果を HALKA(乾電池駆動)に接続してテストをおこなった。SO₂ データをインターネット上で確認することができ、データのリアルタイム送信に成功をした。しかし、10 日ほどで HALKA 内蔵の電池は切れてしまうことがわかった。

5. 太郎坊でのバッテリーでのテスト観測

そのため、富士山麓の太郎坊において、HALKA と SO₂ センサーを電気容量が多い鉛蓄電池(以下、バッテリー)で駆動した観測を行った。約 2 ヶ月間にわたり、観測結果を送り続けられることが確認できた。

6. 富士山頂での越冬テスト観測

富士山頂の測候所の閉局前に、越冬テスト用の測器を設置してテスト観測を行った(図)。複数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。(後に確認できたことだが、HALKA は一度通信が途絶えると、再度電波状況が回復しても通信の再開が困難になることが分かった。)

これらのテストの結果より、通信状況の良い場所に HALKA を設置し、必要量のバッテリーで駆動すれば、山頂での SO₂ の通年リアルタイム測定が可能となるであろうことが見出された。

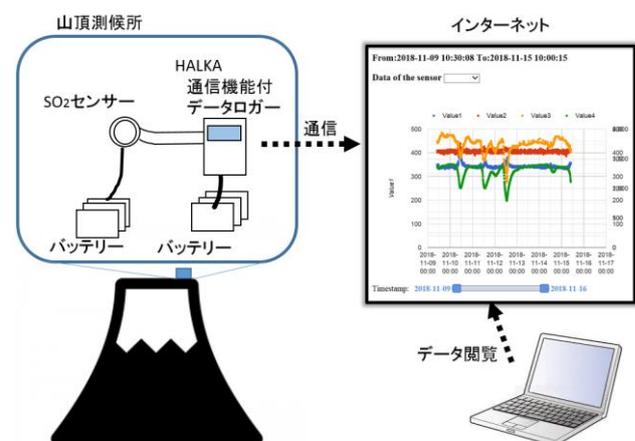


図 山頂での SO₂ リアルタイム測定のご概念図

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。

富士山域環境のレーザー観測システムの調査研究

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

世界遺産となった富士山の山頂や周辺域にライダー(LIDAR)またはレーザーレーダー(Laser Radar)と呼ばれる光波の遠隔測定装置を設置して、気象や大気環境の空間分布情報を遠隔的に観測するシステムの実現を目指して、その基礎的な課題の調査を開始した。まず本年度は山頂の測候所や5合目の観測小屋における条件の調査と、実験に利用可能なシステム等の技術的な検討を行った。

2. ライダーシステムの計測特性と設置条件

本研究で実現が期待されるライダーシステムについてこれまで種々の検討を行ってきた^{1,2)}。表1に現状のライダー方式の大気観測要素やレーザー波長、測定距離・高度、さらに富士山で観測が期待される計測情報などを示す。

ミー散乱方式ライダーではSPMエアロゾルの粒径や重量濃度の分布や越境汚染の測定、ドップラー方式では突風や竜巻などの風向・風速の3次元計測などが可能となる。さらに湿度や気温などの気象要素の測定も実現できる。これらの構成により現状の気象予報の高精度化や局地的な異常気象の詳細な監視などが可能となる。また、分子の差分吸収ライダーでは地球温暖化や噴火ガスなどが検出可能となる。

これらのライダーの装置構成は比較的大型で消費電力も数kWが必要となる。そのため、これらのシステムの現状での利用は頂上付近での動作は困難である。しかし、5合目付近の観測基地での動作は可能なものと判断される。これらのシステムは既に国内の大学や研究所などにおいて利用されており、実用的な製品も開発されている。本格的な観測システムの実現には利用者等のニーズの調査や装置の取得や借用等の作業が課題となる。

3. 小型ライダーによる富士山での観測研究

富士山の頂上付近の自由対流圏での新粒子生成過程の研究として、エアロゾル成分の鉛直輸送のライダー計測と山頂の測候所や気球等をプラットフォームとした直接計測との同時観測が2013年より京都大学と東京理科大学の共同研究により行われてきた³⁾。2015~2016年の観測では、富士山麓太郎坊(標高:1290m, 北緯35.2, 東経138.8)を観測基地として、アイセーフ性の高いマイクロパルスライダーを用いた観測を実施し、大気境界層高度やエアロゾル

消散係数の時間変化と山頂での新粒子生成過程との関係について考察した^{4,5)}。

表1 富士山ライダーの計測情報

観測要素	ライダー方式	レーザー波長	測定距離 水平/高度	計測情報
エアロゾル・ 雲・雨・雪	ミー散乱ライダー (ラマン散乱ライダー)	355/1064nm 1550nm	30km/15km 20km/10km	SPM, PM2.5, 粒径、重量濃度 黄砂、越境汚染、噴煙拡散
風向・風速	HSRドップラーライダー コヒーレントドップラー	355nm 1550nm	10km/30km 30km/10km	突風、竜巻、山岳気象 航空気象予報
湿度	ラマン散乱ライダー	355nm	10km/10km	雲の生成、集中豪雨予報
気温	HSRライダー	355nm	10km/80km	ヒートアイランド現象 高層気象予報
分子	差分吸収ライダー	370- 3000nm	10km/10km	CO ₂ , CH ₄ , SO ₂ , H ₂ S 温暖化予測、噴出ガス濃度
原子	共鳴散乱ライダー	580- 800nm	/120km	超高層Na, K, Ca+, Fe原子 密度、温度、重力波、スプライト

(HSR: 高スペクトル分解能・レイリー散乱)

4. ハイパースペクトルカメラでの汚染分子密度の広域分布計測

さらに千葉大学では小型のハイパースペクトルカメラ(Hiperspectral Imager)を利用して広い方位角度(360度)での多軸差分吸収分光法(MAX-DOAS)⁶⁾による大気汚染物質の二酸化窒素NO₂密度分布を可視化する装置を実現した^{7,8)}。可視の波長領域(400~750nm)で約1000本の波長識別能力を持っており、晴れた日の空の撮影から太陽光が大気分子等に散乱されて観測者に到達するまでに通過してきた大気の吸収スペクトルを画像のピクセル毎に調べ、都市域上空(図1)と滑走路上空の大気中において人間活動や飛行機の離陸等に伴って発生するNO₂濃度の空間分布を可視化した(図2)。この測定手法は可視光に吸収をもつ他の気体分子にも適用可能であり、水蒸気(H₂O)や酸素二量体(O₄)の可視化も行った。また、ミー散乱計算と組み合わせてPM2.5のようなエアロゾルの光学特性を推定することも可能である⁸⁾。さらに小型・軽量の装置構成から、富士山での極限的環境での利用も可能である。

5. 差分吸収レーザーセンサーによる分子濃度の高感度計測法の開発

また、本研究グループは赤外域の波長可変半導体レーザー(LD)を利用した携帯型の分子濃度の高感度計測センサ

一の開発研究を行ってきた。

波長 1.5 - 1.6 μm での光通信システムに利用されており、分子の計測にも広く利用されている。大気中へのメタンガス (CH_4) の漏洩を検出する小型の差分吸収型センサーとして地表面等にレーザー光を照射して、1 m の光路長で 10 ppm の高感度特性のセンサーを開発した⁹⁾。光路長を 1 km 程度に長くすると数 ppb の超高感度での検出が可能である。また、波長 2~3 μm の赤外域 LD 等を利用すると、 CO_2 や H_2O , NO_2 , H_2S などの温室効果ガスや噴火ガス、水蒸気 (H_2O) や大気汚染分子などの多数の分子濃度の高感度計測が可能である。さらにこのセンサーは小型のバッテリー駆動での長時間測定も可能であり、富士山頂での通年観測の可能性もあることが今回の調査で判明した。

6. 結言

世界文化遺産の富士山における「富士山環境レーザー観測システム」の実現により次のような機能と成果が期待できる。

- ・本 NPO における富士山の自然科学の研究や教育面での新たな利用が可能となり、広い活動の展開が予想される。

- ・異常気象の状況や環境の変化、噴火等の火山活動の防災情報システムとして登山者や地域住民の利用・活用が可能になる。

- ・富士山の広域での気象や環境の情報はネット配信等の情報産業にも価値が高いため、連携した活動が期待できる。

さらに来年度には、小型で高効率のレーザーセンサーの開発とその観測実験等を行い、高感度で高精度の分子濃度

や気象要素の計測技術の進展を目指したい。

参考文献

- 1) 小林喬郎 (2016). レーザを用いて地球環境を探る：総論. 電気学会誌, 130.8, 526-529.
- 2) 小林喬郎, 椎名達雄, 久世宏明, 矢吹正教, 三浦和彦 (2018). 富士山域の気象・環境ライダー観測システムの調査研究. レーザセンシング学会第 36 回シンポジウム予稿集, 36, 100-101.
- 3) 矢吹正教, 三浦和彦, (2018). 太郎坊上空における大気境界層高度の特徴 -2015~2017 年夏期ライダー観測-, 東京理科大学大気科学研究部門第 2 回成果報告会, 33-34.
- 4) 矢吹正教, 高橋けんし (2015). 森林域におけるリモートセンシング大気計測, 東京理科大学山岳大気研究部門第 4 回成果報告会, 30-31.
- 5) 片岡良太, 三浦和彦, 等 (2016). その場観測とライダー観測から探る富士山頂における新粒子生成の要因, 第 33 回エアロゾル科学・技術研究討論会, C05.
- 6) Irie H., Takashima A., Kanaya Y., et al. (2011). Eight-component retrievals from ground-based MAX-DOAS observations, *Atmos. Meas. Tech.* 4, 1027-1044.
- 7) Manago M., Kuze H., et al. (2018). Visualizing spatial distribution of atmospheric nitrogen dioxide by means of hyperspectral imaging, *Appl. Opt.*, 57, 5970 - 5977.
- 8) Manago N., Kuze H., et al. (2013). Retrieval of tropospheric aerosol parameters using hyper-spectral imaging camera, *IEEE IGARSS*, 2192-2195.
- 9) 椎名達雄, 小林喬郎 (2014). メタンガス遠隔吸収センサーの高感度化のための最適波長変調法の検討. レーザライダー研究会, 第 32 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, 32, P-32, 102-103.

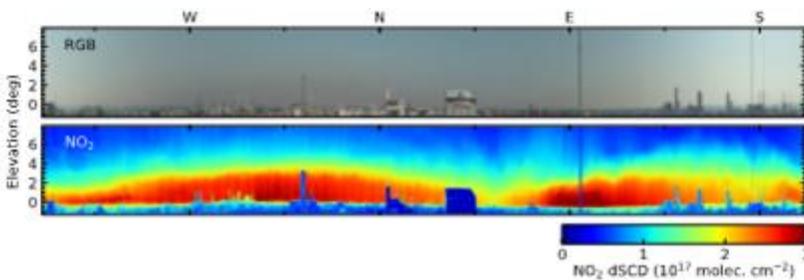


図 1. 千葉大学屋上から地平線付近を 360°見渡すパノラマ画像の比較
通常のカメラの画像 (上図) と NO_2 濃度の分布画像 (下図)

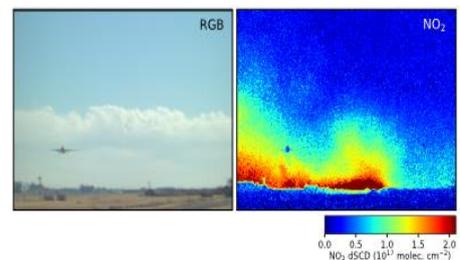


図 2. 滑走路上空を撮影した画像 (左図) と
航空機排気ガスの NO_2 分布画像 (右図)

富士山体の既存接地線を用いた高感度雷現象測定器の開発

安本勝¹, 鴨川仁², 佐々木一哉³, 土器屋由紀子⁴

1.(株)ヤマザキ, 2. 東京学芸大, 3.弘前大, 4.NPO 法人富士山測候所を活用する会

1. はじめに

筆者らは夏期観測期間に富士山での実証実験を行い、その結果を反映させながら富士山体の既存接地線を用いた高感度雷現象測定器の開発を行っている。

富士山測候所(以下、測候所)電源は、図1のように山麓

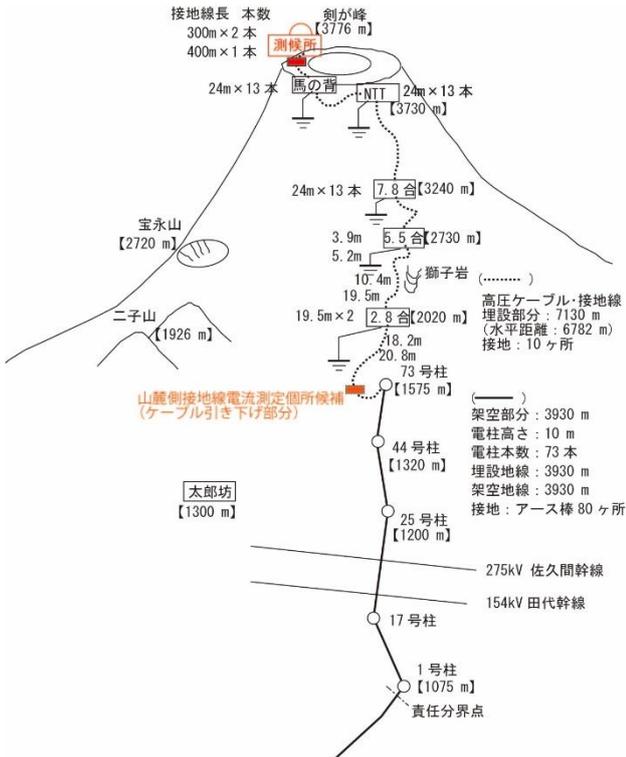


図 1 測候所接地線電流測定箇所(■)、山麓側接地線電流測定箇所候補(■)

から長さ約 7 km になる高圧ケーブルを引き込んでいます。これに伴う測候所接地線は高圧ケーブルに並行し山麓側の接地極に繋がり山麓送電線の架空地線にも繋がっている。測候所は岩盤上にあるため、測候所接地抵抗は小さくできず大きい。一方、山麓側の接地抵抗は小さい。このことから、接地線で山麓に流れる測候所直撃雷電流を測定できるのではないかと、2012年夏季に初めて測定を行った。この時、直撃雷は無かったが、代わりに周辺雷による電流が多数測定された。以降、直撃雷だけではなく周辺雷現象によって流れる電流も測定している。

2015年には直撃雷が観測され同時に周辺雷測定系に上向き雷の前兆現象も測定された。しかし、現象時間全体を測定できる適切な測定系で無かったため、細切れの測定で全体像の測定はできなかった。翌2016年以降は、改良し全体像が測定できる上向き雷前兆現象用測定系を加えて測定している。

また、2017年度の測定は、従来の測定系がオフセットのために安定なトリガーレベルを確保できていなかったことを改めトリガーはオフセットの影響を受けない測定系にした。その結果安定なトリガーレベルを確保でき、周辺雷現象により生じる接地線電流の安定な測定が可能になり、以下のことも明らかになった。

測候所と山麓を繋ぐ7 kmの接地線は、山体と大きなループを構成することになり、雷放電路との大きな電磁結合ができることが分かった。さらに富士山測候所は接地線に繋がる3776 mの高さにある大面積電極の爪と考えることができ、雷雲電荷との大きな静電誘導結合ができる。接地線電流を測定することで何れの雷現象に対しても高感度な検出器になる。また、周辺落雷電流の捕集と山麓からの逆流電流の散逸の大面積電極にもなり、これらに対しても高感度な検出器になる。

このため、測候所と山麓を繋ぐ接地線に流れる電流を測定することで、色々な雷現象について、高感度な測定を可能にすることが分かってきた。この接地線を用いた雷現象測定は初めてのものであり、検出器の原理、得られる性能、及びどのような雷現象を測定可能にするか毎年の観測で得た結果を測定系に反映させ検証する方法で改良を進めている。2018年夏季測定では、直撃雷は無く、周辺雷の測定結果は、雷現象に対応するものと推測される多数の電流検出があったが、検出系のトラブルから現象を反映する電流測定がなされなかった。

本報告は今迄の測定結果を見直し、次年度以降の課題を明らかにし、その解決策について今後の測定にどのように対応すべきか検討した内容を報告する。

2. 接地線に流れる電流の測定

2-1 測候所の接地

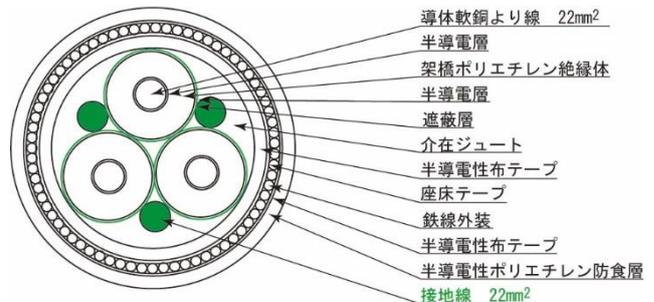


図 2 富士山測候所引き込み高圧ケーブルの構成
架橋ポリエチレン絶縁ポリエチレンシースー重鉄線外装ポリエチレン防食ケーブル

測候所の接地は、測候所を接地極としたものと山麓接地極に繋がる接地線がある。測候所と山麓を繋ぐ接地線には、被測定対象の高圧ケーブル内接地線(図2)、接地線に転用した旧高圧ケーブル、及び接地線の3系統がある。各アドミタンスは図に示すものとしている。このうち測定する接地線電流は高圧ケーブル内接地線に流れる電流である。接地線を介して測候所から山麓に流れる全電流を測定しているのではないため、全電流を知るための校正が必要になる。

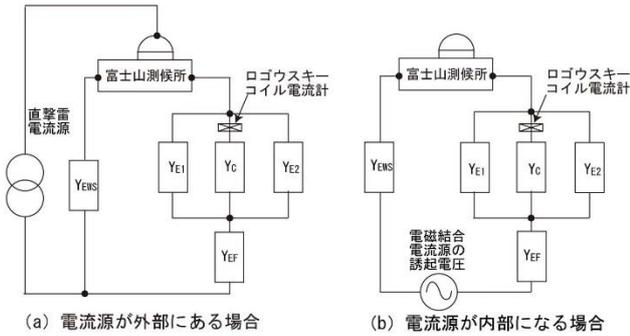


図3 接地回路の電流源位置による等価回路と校正値

雷現象による電流発生源が、測候所接地極と山麓接地極に繋がる接地線が作る接地回路の内部か外部かによって、各接地線への分流値が変わる。

例えば、発生源が接地線回路の外部になる測候所直撃雷の場合、図3(a)のように雷電流は測候所から山麓に繋がる接地線だけでなく、富士山体を通して大地に流れる電流もある。この場合、校正値 c_{LC} は以下の式になる。

$$c_{LC} = \{Y_{EWS}Y_{EF} + (Y_{EWS} + Y_{EF})(Y_{E1} + Y_{E2} + Y_G)\} / Y_G Y_{EF} \quad (1)$$

一方、雷放電路との電磁結合によって流れる電流は、図3(b)のように山麓に繋がる接地線と測候所電極が作る接地回路と雷放電路との電磁結合による誘起電圧によって流れ、この場合、電流発生源は内部回路になる。この場合、校正値 c_{MEC} は以下の式になる。

$$c_{MEC} = (Y_{E1} + Y_{E2} + Y_G) / Y_G \quad (2)$$

2-2 電流測定方法

接地線電流測定の基本回路は、図4に示すログウスキーコイル電流計である。接地線電流測定は、接地線を流れる電流が作る径方向磁界にのみに感応し軸方向磁界には感応しないログウスキーコイルを使用し、出力電圧に比例する

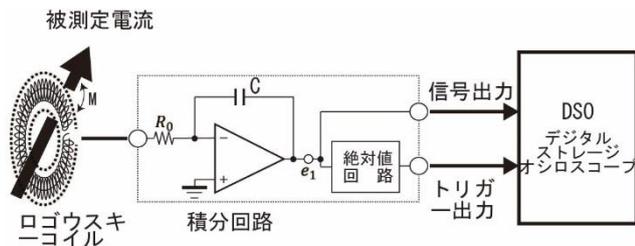


図4 高圧ケーブル内接地線電流測定用のログウスキーコイル電流計

電流を積分する方法で被測定電流に比例する電圧が得られるようになっている。なお、積分コンデンサーには測定に影響しない放電時定数になる抵抗が並列接続されている。

電流計出力電圧はデジタル・ストレージ・オシロスコープ(以下 DSO)のロギング機能により USB メモリーに記録する方法を採用している。

落雷の極性や落雷位置によって得られる電圧の極性が変わるため、正負極性何れの場合もトリガーできるように出力電圧の絶対値をトリガー信号にしている。

データの取得数は、ノイズレベルを十分上回るようにしてトリガーレベルを下げ高感度にすることで落雷情報数に近い信号数が得られることが測定から分かっている。しかし、多量なデータについて自動的に処理する適切な方法はまだ確立されていない。データ処理の自動化による省力化は、測定系の洗練化と同時に進め実現させることが必要である。複数の雷現象による影響が重畳したものになるため、現象の分離方法も含めた解析によるデータ処理の自動化が必要である。より正確な結果を得るためにも他の観測、落雷情報や電界測定と共に行うことが必要である。

3. 接地線に電流を流す雷現象

山麓に繋がる接地線に電流を流す現象は色々と考えられるが、明確なものは測定対象にしている雷によるもので以下の現象がある。(1)測候所直撃雷、(2)放電路との電磁結合、(3)雷雲との静電誘導、(4)測候所電極捕集電流、(5)山麓接地線電位上昇による逆流電流が考えられる。測定される電流はこれらの複数の現象が重畳しているのが一般的と推測される。高圧ケーブル内接地線のみが山麓に繋がる全接地線でないことによる高圧電源の零相電流によるものも観測されることを想定していたが、2012年8月16日の小動物による地絡事故時と遮断器の開閉時に観測されているのみで、通常は観測されず無視できるものと考えている。その他の自然現象によるものもあると予想している。以下、接地線に電流を流す雷現象の特徴をまとめたものである。

3-1 測候所直撃雷

測候所が被雷した場合、図5に示すように落雷電流は測候所電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から山麓側接地極に流れる電流がある。山麓側に繋がる接地線は複数あり、その一つである高圧ケーブル内接地線に分流して山麓側に流れる。被雷電流測定は高圧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、全電流に校正が必要になる。

各分流回路の周波数特性が無視できないことも考慮して、その影響を受けない校正方法として、仮設避雷針の被雷電流をシャントにより絶対測定する方法で正確な電流を知り、さらに高圧ケーブル内接地線電流を同時測定し、両者の比

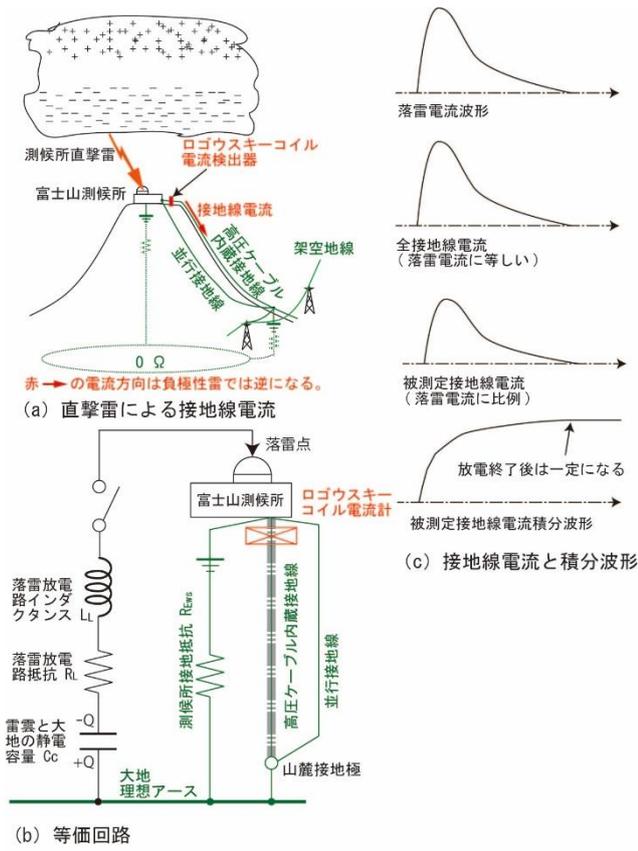


図5 測候所直撃雷電流

を校正値とすることで正確な電流を求めることができる。仮設避雷針には避雷針高さを高くするなどの被雷頻度を高める工夫とシャントによる安定な電流測定を可能にする工夫が必要になる。

校正可能にすることで正確な被雷電流を求めることができる。測定被雷電流パルス波形の時間幅が放電時間になるので、測定電流パルス波形をその時間で積分することで落雷放電電荷量も求めることができる。

3-2 雷放電路との電磁結合

図6(a)に示す測候所接地線と山体が作る循環路の電磁誘導電圧は、その循環路と被測定雷現象の雷放電路電流が作る磁束との結合分を微分したものになる。(b)がその等価回路になる。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。
- ③ パルス幅時間は放電持続時間になる。
- ④ 落雷放電路が鉛直の場合、図21に示すように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。

雲上部が正極で下部が負極の雲放電の場合、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

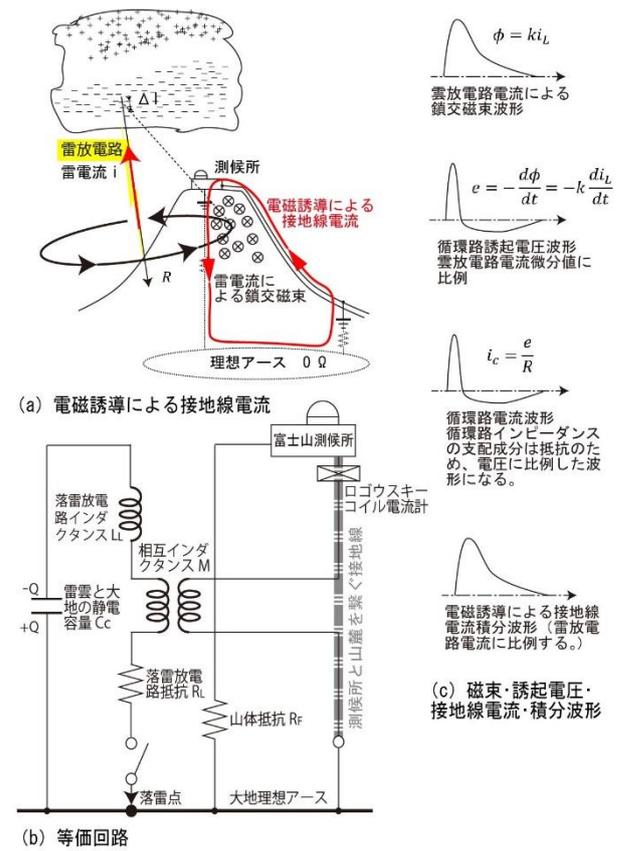


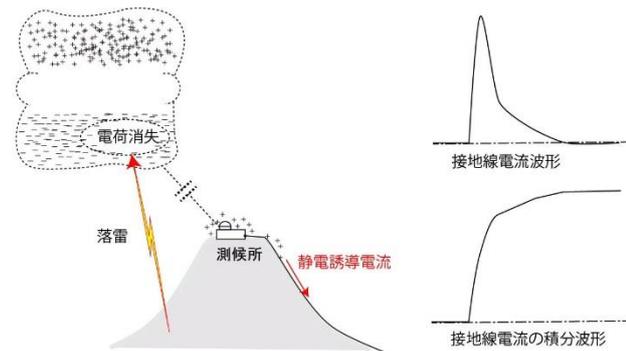
図6 電磁誘導による接地線電流（測候所西側の負極性雷）

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 雷雲電荷変化による静電誘導

3776 m 上空にある測候所という大面積(南北約 50 m×東西約 25 m)の凧電極と雷雲電荷との等価結合容量により、図7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、山麓接地極と繋がる接地線に静電誘導電流が流れる。この静電誘導電流は以下の特徴がある。

- ① 放電初期の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に明確に現れないが、測定電流を積分することでバイアス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、積分値には変化なく一定になる。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。



(a) 雷雲電荷変化による静電誘導電流 (b) 静電流動電流の等価回路 (c) 落雷による急激な消失と回復等の雷雲電荷変化による接地線電流と積分波形

図7 雷雲電荷変化による静電誘導電流

3-4 測候所電極捕集電流

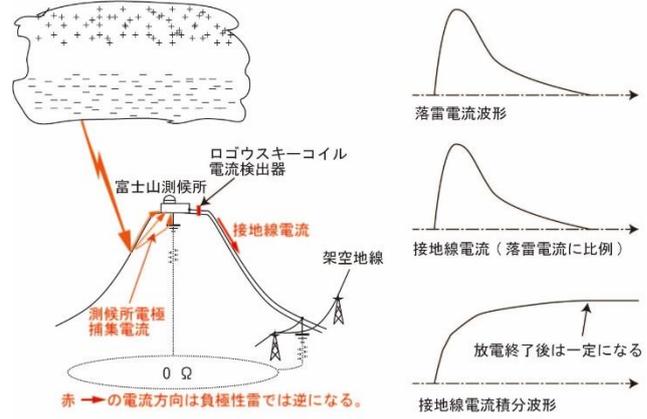
図8に示すように富士山に落雷した電流を測候所に集め接地線を通し山麓に流れる電流である。測候所電位は、接地線で山麓と繋がっているため、山麓電位である。富士山の被雷個所の電位は、一般的に山体抵抗は十分小さくないため、著しく上昇する。測候所との電位差により被雷点から測候所に両者間の抵抗で除した電流が流れることになる。接地線の電流極性は、負極性落雷では負に、正極性落雷では正になる。測候所側の捕集電流は遠方になると小さくなり大地への拡散を考えるとほぼ距離の2乗に反比例するものと考えられる。以下の特徴がある。

- 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。
- ③ 電流極性は、負(正)極性落雷の場合、負(正)になる。

3-5 山麓からの雷逆流電流

この逆流電流は、図9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。

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



(a) 測候所電極捕集電流 (b) 等価回路 (c) 接地線電流と積分波形

図8 測候所電極捕集電流

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、測定箇所がこの循環路に入らないことからこの電流は積分することで0になり測定結果には現れない。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は 3×10^8 m/s と 2.5×10^8 m/s、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のようになる。

- 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 山麓接地系統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

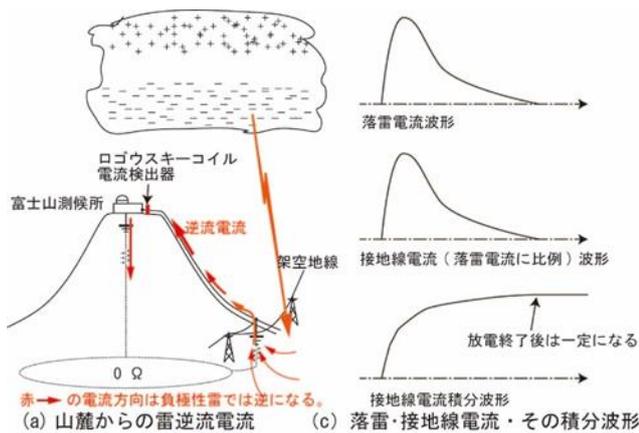


図9 山麓からの雷逆流電流の等価回路

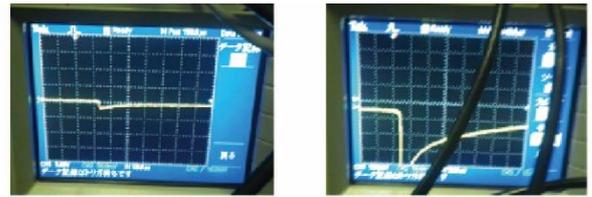
無視できる大きさになると推測される。

4. 観測雷現象より求められる測定系機能

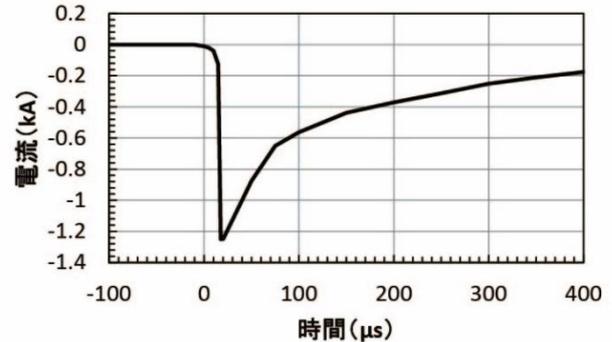
4-1 上向き雷前兆現象

2015年図10に示す直撃雷が観測された時、上向き雷の前兆現象が測定された。しかし、測定時間幅が500 μ sと短かったため、図11に示す4つの細切れの断片的な測定になってしまった。この現象は、USBメモリーへの書き込み時間が設定した測定条件で最大330msがデッドタイムになることを考えると全体で約1秒持続していたことになる。この結果から、直撃雷が上向き雷であった場合、前兆現象全体の測定を可能にするため、直撃雷の測定系は、図12に示すように直撃雷のトリガーと同時に前兆現象を遡って750ms記録することで、上向き雷についての前兆現象全体が測定可能になるようにした。

観測結果の電流変化は、電荷補給を待ちながら放電が不連続で段階的に進展するようにはなっておらず、連続的な変化で変動しているように思われる。ステップリーダ進展で電荷補給が間に合なくなる雷雲からの下向きでなく、山麓からの連続的な電荷補給が可能になっていることで生じた現象と見ることができ、現象の発生時間全体を観測可能にすることでどのように生じているか正確に現象を知ることができる。



(a) DSOによる観測波形



(b) DSO観測波形からの再現波形

図10 2015年8月13日5時6分落雷による高圧ケーブル内接地線観測電流

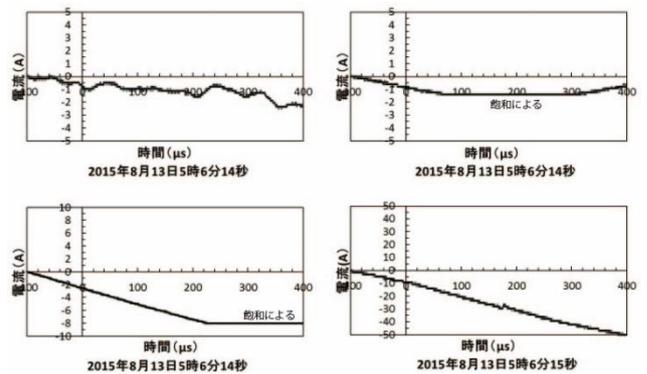


図11 2015年8月13日5時6分に観測された落雷初期の接地線電流変化

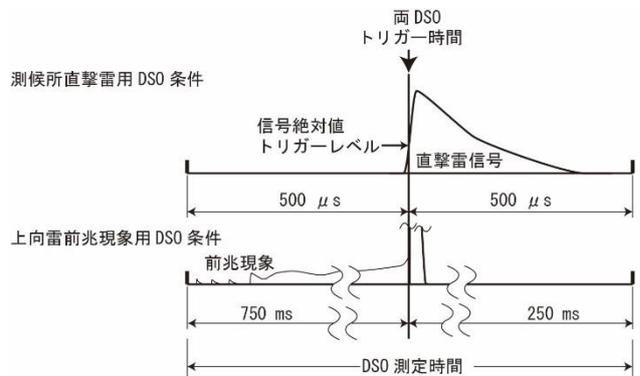


図12 測候所直撃雷と上向き雷前兆現象測定用DSOの信号トリガーレベル・位置と測定時間幅

この測定は、図12に示すように、直撃雷電流測定用と上向き雷前兆現象測定用により行うことになる。直撃雷は大電流測定用ログウスキーコイル電流計で測定するようにし、適切

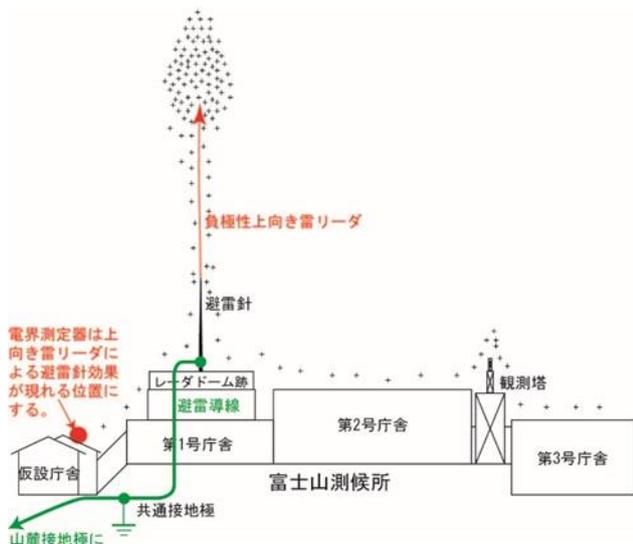


図13 上向きリーダ観測のための理想的な避雷針位置と電界測定器の位置

なトリガーレベルにより、確実に直撃雷信号を測定できるようにし、一方、前兆現象は十分な高感度ログウスキーコイル電流計で測定し DSO の機能を活用し 750 ms 前まで遡って測定電流履歴が十分な分解能で得られるメモリー長で記録できるようにすることで前兆現象を捉えることができるようになる。

また、上向きリーダが進展することで周囲の電界に変化が現れるはずであり十分速い時間応答性のある電界測定計で周囲の電界を測定できるようにすることで前兆現象をより正確に捉えることができるようになると考えている。

この現象の発生頻度を高めるため、効果が現れ易い位置で測候所から突出した高さの避雷針が必要である。この場所として、図 13 に示すように、元レーダドーム中央にあるレーダ支持鉄パイプを利用して、避雷針の強固な基礎になることと、測候所の山麓側代表接地極近くになるため、避雷導線は短くて避雷針の電位上昇を小さくできること、また被雷電流が作る電圧降下による周囲への影響は小さくなる。特に北側になる 2 号、3 号庁舎、及び観測塔は、上流に位置することになり自身への落雷による被雷電流による電圧降下は上流に配置される観測機器に大きく影響することになる。これが小さくなることからレーダドーム跡への避雷針設置は測候所を活用する他の研究にも好ましく、雷の影響を受けにくい環境を提供できるものと考えている。

4-2 ステップトリーダとリターンストローク

2017 年夏季測定で測候所近傍の落雷に図 14 のステップトリーダが測定された。しかし、この前兆現象が使用 DSO の測定時間に収まらなかったため、引き続き生じるリターンストロークは測定できていない。測候所近傍の落雷で観測される下向き雷のステップトリーダ全体を測定できるようにし、且つ引き続き生じるリターンストロークを測定可能にすることが必要である。実現方法として、図 15 のように使用 DSO の電

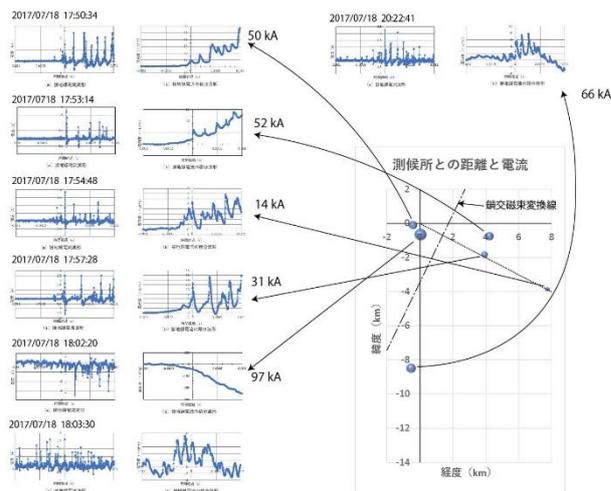


図 14 リーダによる接地線電流測定波形の特徴



図 15 下向き雷ステップトリーダ・リターンストローク測定用 DSO、及び周辺雷現象測定用 DSO のトリガーレベルと測定時間幅

流測定は、電流が小さなステップトリーダから大きなリターンストロークまでの電流に対し、数桁の単位の測定を十分高い分解能で可能になるようにし、他方測定時間は、ステップトリーダ前兆現象に見込まれる時間 20 ms とその後のリターンストロークが十分入る 50 ms を確保し、USB メモリーへの記録は十分な時間分解能が得られるメモリー長で記録することが必要になる。

このステップトリーダとリターンストロークの測定は、図 16 に示す測定系の測候所近傍雷ステップトリーダ・リターンストローク用で行うことになる。ステップトリーダの初期の現象は周辺雷用の高感度測定系でも捉えることは可能になる。

測定電流はできるだけ小さな値から大きな値まで桁の単位で測定可能にするため、ログウスキー電流計の電流分解能、及び直線性はできるだけ高くすることが必要である。そのため SN 比もできるだけ大きくすることが必要である。

4-3 仮設避雷針の実現と実現までの校正方法

仮設避雷針の実現は、被雷電流の絶対測定を測定可能にして被測定高圧ケーブル内接地線電流との同時測定により校正を可能にするだけでなく仮設避雷針からの上向き雷現象の観測等に使用できる。

高圧ケーブル内接地線測定電流を全接地線に流れる電流に換算するため、校正が必要であるが、まだ実現していない。この校正は、測候所被雷を一個所にまとめられる避雷

針を設けることで可能になる。しかし、まだ測候所への被雷を一ヶ所にまとめられる仮設避雷針の設置は実現していない。2018年度夏期測定期間も高压ケーブル内接地線電流を測定していたのみである。

なお、接地線回路を構成する各回路インピーダンスの周波数特性は全て同じで周波数依存性は無いことを仮定できれば、以下のように校正値を決めることが可能になる。

測候所が作る接地線回路の外部に電流発生源が起因する雷現象で電流を既知のものとするものは、測候所の直撃雷である。この被雷電流を測定し、同時に測定した被測定接地線電流との比を取ることで校正値を決めることが可能である。

測候所の被雷は頻繁にあるわけではないので、測候所への被雷個所は一個所にまとめられるようにし、被雷時確実に直撃雷電流と被測定接地線電流を同時測定できるようにする必要がある。直撃雷電流は正確な電流を絶対測定可能なシャントにより測定する必要がある。

費用等で測候所被雷個所を一個所にまとめられない状況もあるので、実現できるまでは落雷情報の落雷時刻・位置・電流から測候所の直撃雷電流を知り、同時測定した被測定接地線電流との比から校正値を求める方法もある。高い校正精度を得るため仮設避雷針の実現は必要であるが、校正用仮設避雷針を実現するまではこの方法を適用せざるを得ないと考えている。

測候所が作る接地線回路の内部に電流源ができる電磁結合による電流に対する校正方法は異なる。外部の場合は(1)式になり、内部の場合は(2)式になる。しかし、測候所接地極抵抗が大きく、山麓側接地抵抗は小さく $Z_{EF} \ll Z_{EWS}$ ($Y_{EF} \gg Y_{EWS}$) の場合、外部の場合でも(2)式に近似でき校正値は同じと考えてよい。

4-4 富士山雷現象を観測可能にする測定系

必要な測定系は、測候所から山麓に繋がる接地線に電流を流す3-1~3-5の現象による電流が測定でき、上向き雷とステップトリーダの何れの現象の特徴も捉えることができる測定系でなければならない。これを満足できる測定系として、考案したものが図16の測定系である。

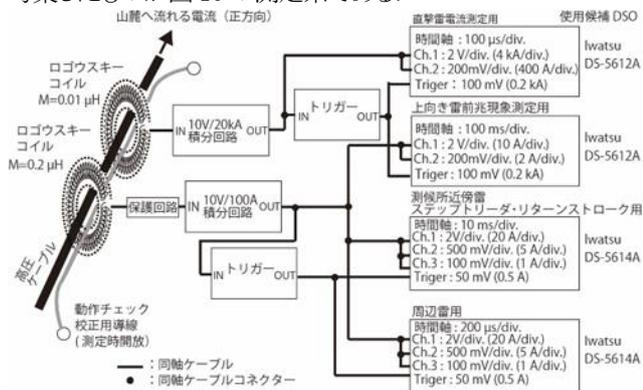


図16 富士山測候所での雷現象観測に必要な接地線電流測定系

測定系は、オフセットの低減、高い直線性、及び大きなSN比が求められる。

電流計出力のオフセット変動がトリガーレベルを超える場合、トリガーできなくなり測定すべき信号を測定できなくなるので、できるだけオフセットを小さくすると共に電流出力信号のSN比はできるだけ大きくして、トリガーレベルはできるだけ小さくすることが必要である。その結果、小さな電流になる雷現象や減衰量が大きくなる遠方の雷現象が測定可能になる。

ロゴウスキーコイル電流計の低雑音化は、自身の低ノイズ化と同時に測定系に侵入する外部ノイズの侵入も小さくできる測定系にすることが必要である。

ロゴウスキーコイル電流計のオフセットは、できるだけ小さくすると共に測定周波数範囲に影響しないAC結合を通して安定なトリガーレベルを決めることが必要になる。現在使用している測定系のトリガーは、AC結合を通してオフセットのバイアスを抑制してから絶対値を取ることでトリガーできるようにして正負極性何れの雷にも安定なトリガーを可能にしている。

DSO各入力の垂直軸は、8bit分解能であるが、その分解能を実質的に高くする方法として、レンジを変えた複数チャンネルを使用する方法を採用している。例えば、直撃雷測定系では2V/div.と200mV/div.を採用するため、16bitの分解能が得られる。

DSO各入力の水平軸は、必要とされる測定時間を十分な分解能が得られるメモリー長のあるものが必要である。

4-5 山麓側での接地線電流測定の実現、及び接地線電流の位置情報への影響評価

ロゴウスキーコイル電流計は、図1の山麓側で架空線から埋設高压ケーブルの立ち下げ部分に設置することになる。しかし、100VAC電源が無いため、天候に左右されず長期間連続使用が可能な太陽光発電とバッテリー等を組み合わせたコンパクトな電源が必要になる。これを実現することで、山麓での接地線電流測定は、夏期に限らず通年測定が可能になるため、冬期の落雷現象も知るようになる。

山麓側接地線電流の測定を可能にすることで、測候所側で測定した接地線電流と比較することで逆流電流の影響を知ることができ、また測候所で測定した接地線電流より逆流電流の影響を取り除くことができる。測候所側接地線電流評価が定量的にでき解析し易いものになる。

2015年8月13日5時6分に測候所直撃雷があったが落雷情報による落雷位置は測候所から東に1.4kmであった。この差の原因は放電路が斜めで実効的に位置がずれたか、あるいは東山麓側接地極に繋がる接地線の流れたことにより実効的な落雷位置がずれたのではないかと推測している。この考えが正しいかどうかは測候所直撃雷時の位置情報の

蓄積から統計的に評価できるものになると推測している。夏期の2ヶ月だけの観測では頻度は少なく、山麓での接地線電流測定を可能にすることで通年観測を可能にして、できるだけ多くの測候所直撃雷を観測可能にする必要がある。

4-6 データ処理方法

多量の測定データが得られることになるため、人手に頼るデータ処理では対応できない。測定データには複数の雷現象が重畳しており、それぞれを分離したうえでそれぞれの現象に対応したデータ処理を行うことになる。

解析方法をどのように行うかを決め、プログラム処理ができるようにすることになる。可能であれば測定の度ごとに処理し、取り出し扱えるようになっていることが必要である。

並行して、どのような測定系にする必要があるか、得られたデータ処理をどのように行うか、仕様を決め、アルゴリズムを作ることが必要である。

時間校正されていることで他の観測、落雷上や電界測定などと合わせて雷現象のより詳細な評価が可能になる。

現在データの記録は4測定系にそれぞれ4台のDSOで記録している。DSOのそれぞれのタイマーは独立であり、それぞれに時間校正が必要である。現在実施している時間校正は、次のようにしている。まず測候所に搬入前に「117」の時報に一致するように各DSOの時刻を合わせる。測定終了後に各DSOの時間と「117」の時報との時間差、及び測定中の等時現象、例えば遮断器の開放・投入時の測定電流時刻と合わせて校正している。1秒以内の正確度での校正が可能である。一昨年提供頂いた落雷情報は、世界標準時(UTC)を使用しており9時間加えることで日本標準時(JTC)に変換できる。データ処理を考えると将来各DSO共統一した時刻で記録処理されるようにすることが必要である。

5. 雷現象位置による測定電流

5-1 重畳した代表的な測定信号

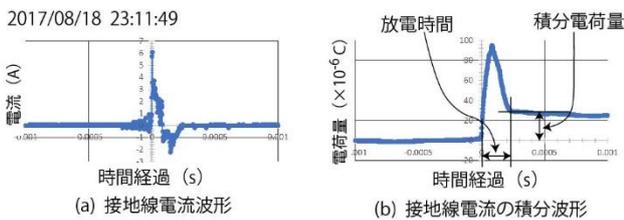


図17 接地線電流測定波形と接地線電流積分波形表示例
測候所起点 経度差：26.7213 km, 緯度差：-10.0060 km, 電流：-155 kA

図17は、重畳した代表的な測定信号の一例として、接地線電流測定波形とその積分波形の表示例を示している。雷位置と両波形から電磁結合による接地線電流と積分電荷が現れる現象が重畳したものになっている。電磁結合による電流変化は、落雷位置の負極性落雷が作る電磁結合による接地線電流極性に合致する。積分電荷が現れる現象は落雷位置と雷極性から測候所電極捕集電流の可能性は無い。静

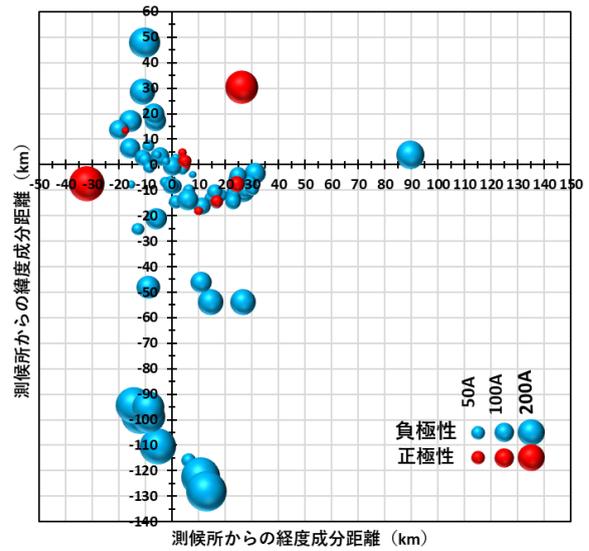


図18 落雷位置とその雷極性・電流

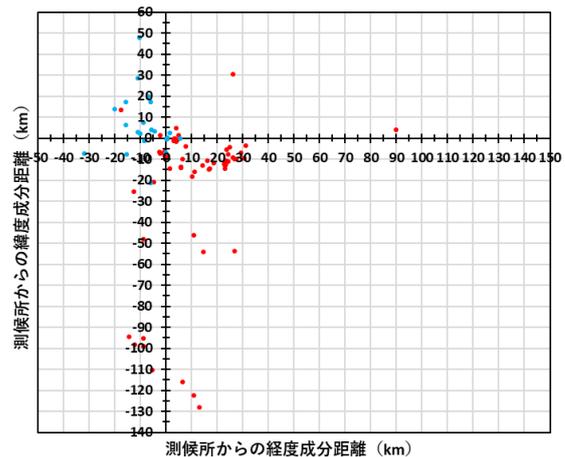


図19 雷測定位置の負極性雷時接地線電流極性

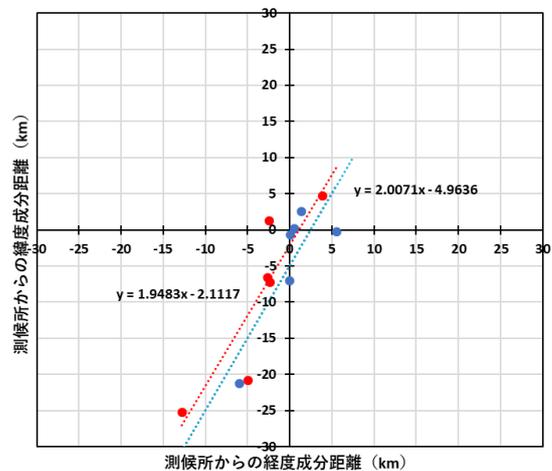


図20 鎖交磁束変換線の求め方

電誘導電流があるいは山麓からの逆流電流によるもの、あるいはいずれも重畳したものと推測される。放電終了後の電荷量の減少変化は電流計積分回路コンデンサの放電時定数によるものか静電誘導電流によるものと推測している。

5-2 観測された落雷位置とその雷極性・電流

図 18 は、2017 年に観測された落雷位置と雷極性・電流である。測候所を原点に横軸に経度距離、縦軸に緯度距離にした落雷位置の雷極性と雷放電電流が上から下に流れる場合が正極性でバールーンは赤色になる。下から上に流れる場合が負極性でバールーンは青色になる。正極性の全てが雲放電によるものと推測される。図中右下にあるバールーンの大きさが 50 A, 100 A, 及び 200 A の電流の大きさになる。

図 19 は、全ての測定点雷放電位置の雷極性を負極性とし、放電路が鉛直になることを仮定したときに接地線に流れる電流極性を測定結果から決めたものである。雷放電位置の電流極性(山麓方向に流れる電流を正としている)は正を赤点、負を青点として示した。

5-3 鎖交磁束変換線・実効的接地線位置と検出感度

図 20 は、図 19 の赤色測定点西側端 6 点、青色測定点東側端 6 点を選び、それぞれの一次近似線を求めたものである。採用測定点からは、明らかに異常な測定点は外している。鎖交磁束変換線は、両一次近似線の平均をとった結果、以下の一次近似線が得られた。

$$y = 1.98x - 3.54 \quad (3)$$

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になる。

$$y = -0.506x \quad (4)$$

山麓側架空線から高压ケーブルで立下部になる 73 号柱は、 -13° の線上にある。測定結果から求められた鎖交磁束変

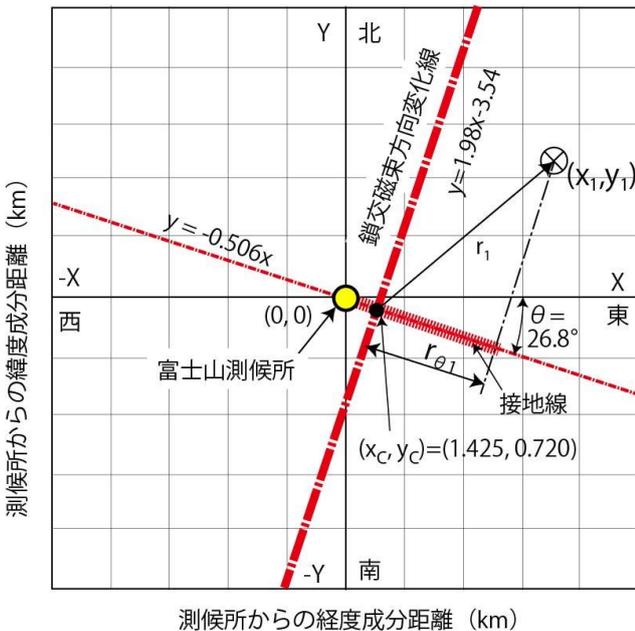


図 21 観測結果から求めた鎖交磁束変換線

換線と直角になる測候所に繋がる既存接地線の等価コイル面は、 -26.8 度で、一致しない。この差は配線経路と山麓までの途中の接地の影響を受けて現れたものと推測している。正確には測定を積み重ね多数の観測から統計的に鎖交磁束変換線を決め、測候所と繋がる既存接地線の等価コイル面の位置を決める必要がある。

図 21 は(3)式の鎖交磁束変換線と(4)式の実効的接地線の直線を示した。この結果から既存接地線雷現象検出器の感度は、図に示した落雷位置と電流から以下の関係式から求めることができる。

落雷電流に比例する検出電流の積分値と、落雷電流が周囲に作る磁束で接地線が作る循環路との鎖交磁束成分との比、 k は以下のようにして求まる。

$$\begin{aligned} \max \int_0^t I_d dt &= k I_{L1} \left(\frac{1}{r_1} \right) \left(\frac{r_{\theta 1}}{r_1} \right) \\ k &= \frac{\max(\int_0^t I_d dt)}{I_{L1}} \left(\frac{r_1^2}{r_{\theta 1}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

なお、

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} \\ r_{\theta 1} &= (x_1 - x_c) \cos \theta - (y_1 - y_c) \sin \theta \end{aligned}$$

である。

従って、落雷情報の落雷位置と落雷電流から落雷電流放電路と接地線が作る循環路との結合係数を求めることができる。

6. 終わりに

以上、今後に生かされるように今迄の研究開発過程で分かったことをまとめた。

既存接地線に流れる電流を測定することで高感度な雷現象測定器になることも分かり、さらに雷現象をうまく捉える測定系の開発を進めている。図 16 は次年度測定に使用予定の測定系である。直撃雷、上向き雷前兆現象、ステップリーダーとそのリターンストローク、及び周辺雷現象測定を可能になるように設計している。

解決しなければならない課題は多くあり、そのための研究開発も並行して進めている。当面の課題として以下のものがある。

- (1) 仮設避雷針の実現は、①被測定高压ケーブル接地線電流の雷電流への正確な校正値の決めることができ、②上向き雷が周囲に与える変化の観測も可能にする、③落雷の影響を受け難い観測ができ、共同利用研究には好ましい環境が実現できる。
- (2) 測定方法は洗練されてきており、感度を高くすることで多量のデータが取得可能になっている。マニュアル処理では間に合わない状態になることは分かっており、貴重な雷現象によるものを見落とす可能性もある。自動と手動両処理を実施できる体制を確保することが必要

である。

- (3) 山麓での接地線電流測定を可能にすることで測候所被雷を通年観測できる。測候所への逆流電流の影響も評価できるようになりより正確な現象を捉えることができるようになる。
- (4) 十分応答性のある電界測定の実現は、上向き雷の避雷針効果の測定を可能にするだけでなく、測候所誘導電流変化と電界変化が同期することは予測されることであり、より詳細な雷現象を捉えることができるようになると推測している。
- (5) 測定系は観測期間測候所に持ち込み設置し、終了時に撤去する方法で観測を続けているが、基本的に手作りであり、そのためと思われる運搬・設置によるトラブルが発生している。信頼できる測定系の確立は継続した観測に必要である。測候所に設置したままにする、あるいは設置に手間がかからない一体化を進めることも含め検討する必要がある。

7. 謝辞

資料や情報提供等で調査にご協力頂いた東京管区気象台の各氏、関電工の井上毅氏、雷観測にご協力頂いた NPO 法人富士山測候所を活用する会の岩崎洋、川原庸照、長門敬明、横山勝丘、天野和明、佐藤裕介、増本亮、宮城公博、澤田実、及び千田敦司の山頂班の各氏、増田純夫、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、この研究の一部は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」を受けた。記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 中村安良, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2012). 富士山測候所雷対策適用上の調査と対策方法. 第5回(平成23年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 26-35.
- 2) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 中村安良, 大胡田智

寿, 土器屋由紀子, 鴨川仁(2013). 富士山測候所の山麓からのケーブルに流れる雷観測電流, 第6回(平成24年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 14-27.

- 3) 安本勝, 佐々木一哉, 高橋浩之, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2014). 富士山環境下での測候所雷対策と山麓への接地線電流測定の準備, 第7回(平成25年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 4-11.
- 4) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2015). 富士山測候所の山麓への接地線電流観測と雷対策, 第8回(平成26年度)富士山測候所利活用に関する成果報告会講演予稿集, 19-27.
- 5) 安本勝, 佐々木一哉, 鴨川仁, 野村渉平, 向井人史, 高橋浩之, 大胡田智寿, 土器屋由紀子 (2016). 富士山測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) 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.
- 9) 石井勝 (2013-9). 上向き雷放電, 第31回レーザーセンシングシンポジウム特別講演.
- 10) 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.
- 11) 北川信一郎 (2001年). 雷と雷雲の科学, 森北出版.
- 12) 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.

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

本研究は宇宙線ミュオンを用いた富士山山頂近傍と表面構造内部の密度長計測を目標に掲げ、7 月に太郎坊に設置した粒子線検出器を用いて観測をスタートした。

宇宙線ミュオンと言えば、ピラミッドなどの内部構造の透視実験が有名である。宇宙線ミュオンのフラックスは天頂方向が強く、これに対し水平方向では 3 桁程落ちる。水平方向のミュオンをラジオグラフィに利用することは困難という定説を覆し、永嶺らはこれまでに技術開発に続いて浅間山や西岩手山などの小規模火山(観測対象物の直径 ≤ 2 km)において、水平ミュオンを用いた透視観察に成功してきた^{1,2)}。田中宏幸らは大々的な火山研究を進めてきている。富士山は宇宙線ミュオンの通常のイオン化過程による飛程に比べてサイズが大きく、未開拓な領域である。当開発研究は防災のみならず、学術的意義にも富む。

7 月から 12 月にかけて、検出器の方位角の微調整、角度分解能の最適化、ゲート時間幅の調整などを実施した。角度分解能の最適化に伴い、検出器はこれまでの他の山体観測例と異なる配置(間隔)となった。これに伴い、ミュオン以外の高エネルギー粒子検出によるバックグラウンドノイズが増加したため、1 月末に鉄中間散乱体(おおよそ重量 1 t)を挿入して長時間測定に入った。発表当日は 3 月中旬までに取得・積算した観測データを報告する。



図1 観測装置の構成(外観写真)

2. 観測原理および装置

宇宙線ミュオンとは、文字通り宇宙線に由来するミュオンである。宇宙から降り注ぐ主に高エネルギー陽子などが大気上層部の原子核と衝突し、原子核反応によって生成される 2 次粒子のうち荷電 π , K 中間子が崩壊して生じる。ミュオンの寿命は $2.2 \mu\text{s}$ であるが、ほぼ光速で飛来するため相対論効果で寿命が伸び、地上まで到達できる。運動エネルギーは、GeV \sim TeV に分布し天頂角に依存したエネルギースペクトルを有する。

観測装置の外観写真を図1に示す。宇宙線ミュオンはシンチレーションカウンタ(縦横 30 個のプラスチックシンチレータ(30 \times 30 \times 1000 mm)と光電子増倍管で構成)で検出する。このカウンタを縦横それぞれ 30 本ずつ配置した 30 \times 30 アレイを位置敏感検出器として、それぞれを 2 面設置してホドスコープを組み、同時イベントのみを抽出することで、飛来した 1 個のミュオンの角度情報を得る(図2)。角度ごとに飛来する宇宙線ミュオンの強度分布を測定して、富士山山体透過による減衰率の空間分布

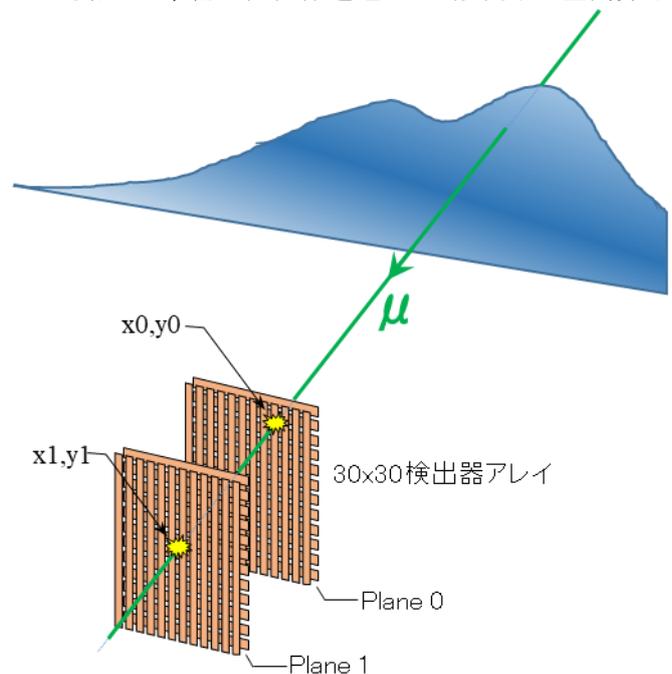


図2 宇宙線ミュオンによる富士山透過計測の概略図

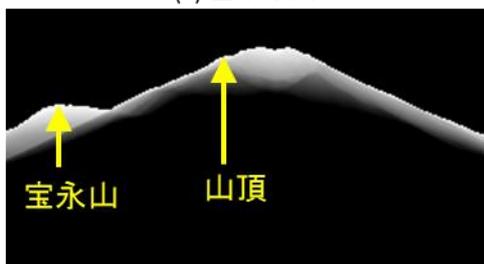
を算出する。この減衰率は密度長の関数であるため、地図データをもとに山体がすべて岩石で構成されている場合の減衰率と比較することで、例えば水などが存在すれば密度長の異常値として検出できると考えられる。富士山を透過する前の宇宙線ミュオンの強度は、富士山に対して逆側から飛来したものをを用いる。宇宙線ミュオン強度の角度依存性は天頂角のみに依存し、方角には%以下しか依存しないためである。

3. 観測領域のシミュレーション

図3に観測地点(太郎坊)から撮影した富士山山頂の写真(a)と、グレースケールで表現した観測地点からの山体透過距離(b)を示す。山体透過距離は国土地理院の標高データを用いて算出した。山頂火口や宝永火口および中腹における宇宙線ミュオンの透過距離が 2 km と見積もられ、この領域の密度異常検知の可能性が示唆される。例えば山頂直下に球状ボイド(直径 1 km)を仮



(a) 山頂写真



(b) 山体透過距離
0~2kmをグレースケールで表示



(c) ボイドを仮定した山体透過距離
0~2kmをグレースケールで表示

図3 観測地点(太郎坊)におけるシミュレーション

定すると図3(c)の様に見える。今後はこれに天頂角・エネルギー分散を考慮した距離依存性を含め、シミュレーションの精度を向上し、観測データと比較する予定である。

4. 検出器の最適化

かかる巨大な山体を、山頂から 7.6 km も離れた観測地点から透視した例はまだない。7 月に観測を開始して以来、約 1 か月ごとに検出器の配置を変えて観測し、2組のカウンターアレイの距離 2.4 m を、この観測地点における最適配置と決めた。さらに1月末に、ミュオン以外の放射線バックグラウンドを低減するための鉄散乱体を挿入した所、山頂火口と宝永火口に対応する濃淡の兆候が見え始めた。発表では、観測データとシミュレーションを比較しながら、巨大火山の監視に関する宇宙線ミュオン直接透視法の応用可能性と課題について議論する。

5. まとめと今後の展望

7 月に宇宙線ミュオン観測装置の富士山太郎坊への設置が叶い、装置を調整しながらの予備的観測を開始できた。検出器の角度や分解能を調整して、1 月末から観測データを蓄積している。今後はさらにデータを蓄積し、統計誤差の軽減やさらなるバックグラウンド軽減対策を実施し、山頂火口や宝永火口および表面構造内部の水などの空間分布を可視化に挑戦する。

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。

参考文献

- [1] 永嶺謙忠 (1995). 宇宙線ミュオンを用いたトモグラフィ. 地学雑誌第 104 巻第 7 号, 998-1007.
- [2] 田中宏幸, 永嶺謙忠 (2003). 宇宙線ミュオンによる火山体内部探索. 火山第 48 巻第 4 号, 345-366.

富士山チャレンジ 2018 実証実験結果報告

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.東京学芸大学

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18日～8月27日の10日間で延べ14,672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、③登山道のレーザー計測による高精度地形測量を実施した。

(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50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。

また、期間中の8/26には登山者約3,000人のIDリストから、現時点での登山者の位置や人数を検索し特定する実験も行った。



写真 1 (左) 登山者用ビーコン

写真 2 (右) レシーバー機器 (Android スマホ)

(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 富士山チャレンジシステム構成図

(3) 登山道のレーザー計測による高精度地形測量

吉田口、須走口、御殿場口、富士宮口の各登山道(下山道を除く)および山頂周回歩道をハンディタイプのレーザー計測器で計測し、高密度の3次元地形点群データを収集し、登山道の地形的特徴を整理した。



写真3(上)計測状況、写真4(下)地形解析データ

3. 実証実験結果

(1) ビーコンを活用した登山者動態データの収集・分析

今シーズンの登山者動態データの収集・分析では、登山者の山頂にいる登山者数を30分単位で整理した。結果としては、御来光時間(5:00頃)の前後4時~7時の時間帯に、山頂に到達した登山者の約半分が滞在していることがわかった。一方で、日別でみていくと、週末(土・日)と平日では、登山者のピークの出現に差があることがわかった。週末は圧倒的に御来光時間帯に集中しているのに対し、平日は正午頃にピークが出現することもあり、平日のほうが登山者の分散化が進んでいると推測される。

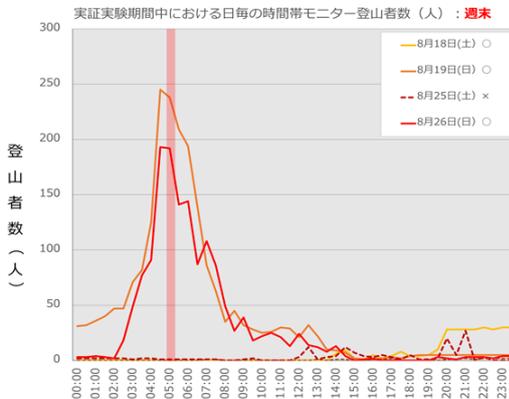
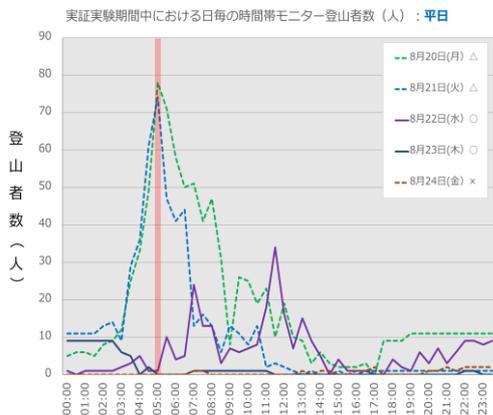
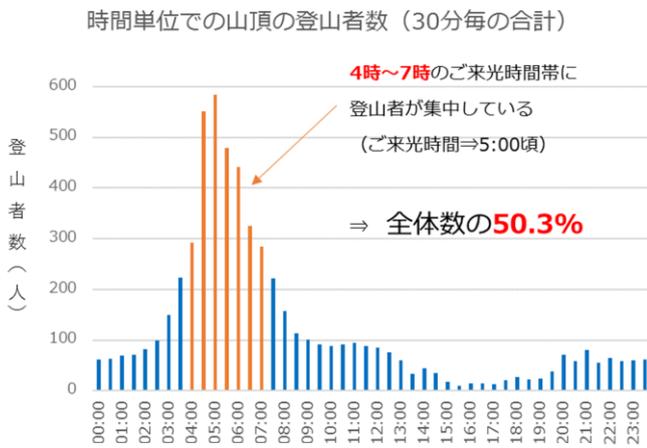


図. 2(上) 時間単位での山頂登山者分布数

図. 3(中) 平日・時間単位での山頂登山者分布数

図. 4(下) 週末・時間単位での山頂登山者分布数

(2) ビーコンのQRコード読取による周知情報伝達

①登山履歴及び混雑状況

リアルタイムの登山者の動態データを基に、各レジャー箇所への通過履歴を時系列に整理分析することで、登山者の登山履歴として整理することが出来る。登山者数を30分単位で更新し、円グラフ(大きさで人数を表現)で表示した。

③登山者通知情報

個人専用のURL内にメッセージボックスを置き、ある特定の箇所に到達した場合にメッセージを伝達する機能を作成した。今回は、山頂に到達した登山者に「登頂おめでとうございます」のメッセージを伝達した。この通知情報は8/26に実施したが、当日のビーコン調査参加者1,257名に対し、専用URLを生成閲覧した人数は371名(約29%)、登頂してメッセージが伝達された人数は52名で、そのうちメッセージを確認した(OKボタンを押した)人数が37名だった。(メッセージの確認率は71%)



図. 5 周知情報の伝達イメージ

(3) 登山道のレーザー計測による高精度地形測量

吉田口、須走口、御殿場口、富士宮口の各登山道(下山道を除く)の地形勾配を整理した。その結果、区間毎の平均勾配や区間長などこれまで正確な情報がなかった登山道の特徴量が明らかになった。

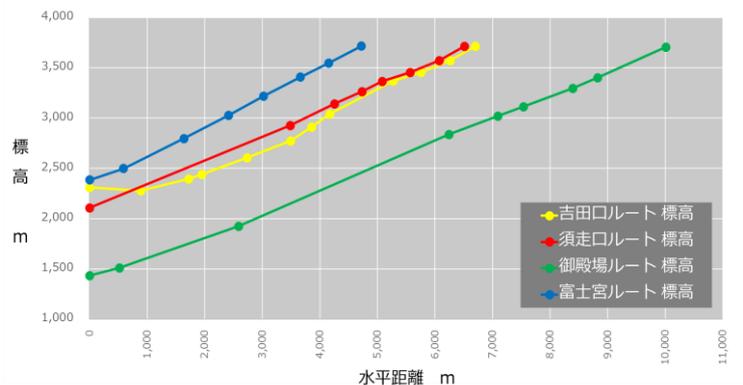


図. 6 各登山道の勾配と区間長

4. おわりに

次年度以降も継続的にデータを収集していき、安全登山に向けてのデータ分析や利活用を進めていく。

ELTRES (ソニーの LPWA) の通信実験

荒島謙治¹, 尾花文一¹, 青木孝行¹, 北園真一¹, 加藤伸雄¹, 西出葵嘉¹, 鴨川仁²

1.ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社, 2.東京学芸大学

1. はじめに

ソニーは高感度により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長距離省電力無線技術(LPWA:Low Power Wide Area)の ELTRES (エルトレス)を開発した¹⁾。

本無線通信技術は、周波数は 920MHz 帯で空中線電力 20mW の特定小電力無線でありながら、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ち、欧州電気通信標準化機構(ETSI: European Telecommunications Standards Institute)において国際標準規格として公開された²⁾。

2. 登山時の位置把握の実験概要と結果

ELTRES 送信機を夏季観測メンバー及びブルドーザーに搭載して、荷揚げ・荷下げ時の GPS(位置/高度)・温度・加速度を送信して、約 100km 離れた複数の受信機で受信する実験を 2018/8/22 に行った。

実験の結果、富士山の荷揚げ・荷下げ時の刻々と変化する位置・高度・温度・加速度をリアルタイムに把握することに成功した。図 1 に荷揚げ時の移動履歴の画面を示す。

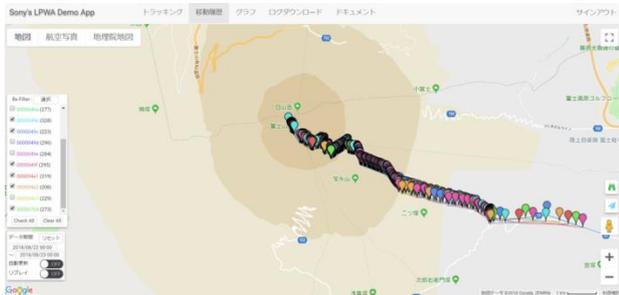


図 1 富士山の荷揚げ時の移動履歴の画面

図 2 に荷揚げ時の高度グラフを示す。麓から山頂の 3,776m まで高低差 2,500m を 3 時間半で登ったことがわかる。同様に温度や加速度の変化を把握することで登山者の状態を推測することも出来た。

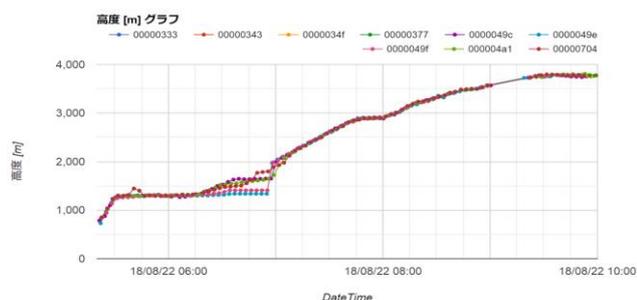


図 2 富士山の荷揚げ時の高度グラフ

3. ELTRES 送信機の越冬設置

富士山測候所の 4 カ所の室内窓際に ELTRES の送信機を 1 台ずつ越冬設置した。送信機の電池には低温で長期間の動作が可能なりチウム一次電池 LS33600 (3.6V 17Ah)を用いた。電池本数は低温での容量低下と冗長分を考慮して 6 本を並列にした。測候所内の設置場所と設置方法を図 3 に示す。



図 3 測候所室内窓際に ELTRES 送信端末の取り付け

各送信機は、3 分毎に温度データを 920MHz 空中線電力 20mW の電波で継続送信し、100km 以上離れた東京都心を含む複数の実験受信局で受信を行う。図 4 に送信機から実験受信局への通信を地図に示す。



図 4 送信機から実験受信局への通信

4. 越冬設置の実験結果

4-1. 越冬連続通信

2018 / 8 / 22 に送信機を設置して通信を開始してから、2019 / 1 / 31 時点で 5 カ月間以上の連続通信を確認した。電池残量は 5 カ月経過時点で 100%を示し、連続通信は継続している。送信機を通年設置することで、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る。夏期 2018/9/6~9/13 の温度グラフを図 5 に示す。窓際で直射日光が当たるため昼間は 38.5℃まで上がり、夜間は-2℃まで下がり、約 40℃の温度変化があった。



図 5 夏期 2018/9/6~9/13 の測候所内 4 カ所の温度変化

冬期 2019/1/24~1/31 の温度グラフを図 6 に示す。窓際で直射日光が当たるため、昼間は 20℃まで上がる。一方で夜間は-30℃まで下がり、約 50℃の温度変化があった。1/26 21:21 に最低温度-30℃を観測した。同時刻の気象庁による富士山の気温も同じく-30℃を記録しており³⁾、屋外と同じくらい極寒になっていることがわかる。



図 6 冬期 2019/1/24~1/31 の測候所内 4 カ所の温度変化

4-2. 気象環境による 920MHz 通信への影響

降雨や雨雲などの気象環境による 920MHz 通信への影響を確認するため、2018 年の台風 24 号が日本に上陸した時のデータを分析した。図 7 に台風 24 号の経路図と 9/29~10/1 の気象レーダー画像を示す⁴⁾。気象レーダー画像より、富士山及び周辺に非常に発達した雨雲と激しい降雨が通過したことがわかる。

○台風経路図

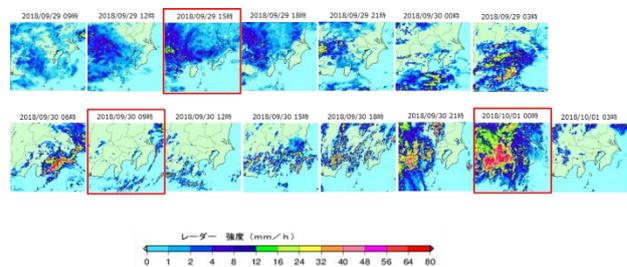
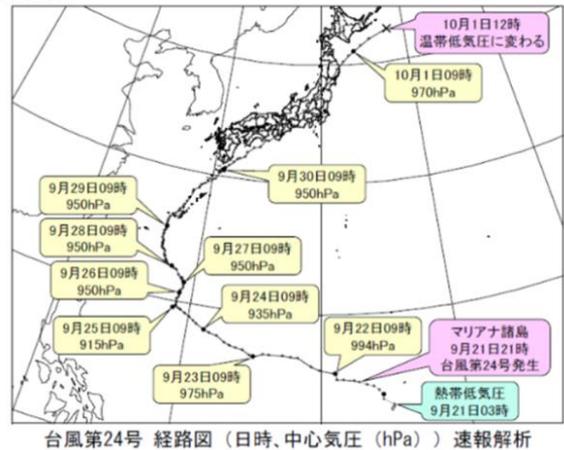


図 7 2018 年台風 24 号 経路図と気象レーダー画像

図 8 に富士山測候所の信号を東京都の実験局で受信したときの信号強度(RSSI)の変化を示したグラフを示す。

約 100km の無線伝送路にある雨雲と降雨は大きく変化したにも関わらず、信号強度は変化していない。天気の影響を 920MHz の通信は受けていないことがわかる。

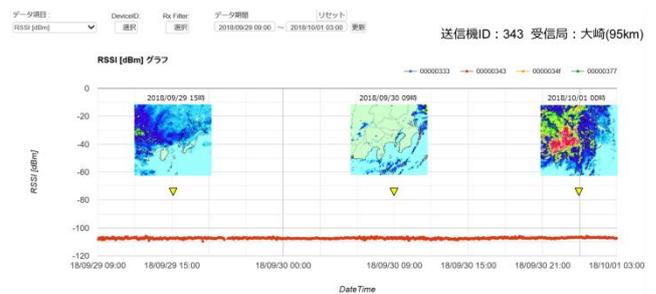


図 8 天気による信号強度の変化 (品川区大崎局)

4-3. 最長通信距離

最長通信距離を確認するため、富士山が見える最遠の地と言われている和歌山県那智勝浦市 妙法山(標高 749m) 富士見台に小型受信機を持って行き、受信実験を行った。図 9 に小型受信機の設置場所の周辺環境と受信アンテナを示す。



図9 321km 受信地点の周辺環境と受信アンテナ

受信実験の結果、富士山測候所から 321km 離れた場所で利得 0dBi のホイップアンテナを接続した小型受信機は安定して受信することが出来た。送信機は室内のガラス越しに置かれ、受信アンテナの周辺は木々に遮られている環境でも通信できたことで、通信安定性が高いことがわかる。図 10 に富士山測候所から 321km 地点にて受信確認した地図を示す。



図 10 富士山測候所から 321km 地点にて受信確認

5. 考察

富士山登山時の位置把握の実験では、荷揚げ時の移動を約 100km 離れた受信機で受信して、リアルタイムに位置や状態を把握することに成功した。富士山広域で登山グル

ープの位置把握ができる手段を提供できれば、安全管理に貢献することができる。

富士山の測候所に ELTRES 送信機を越冬設置することで、高度 3,776m で温度変化 40°C ~ -30°C の厳しい環境における様々な実験を行うことが出来た。越冬連続通信は、-30°C の極寒の環境に耐えて 5 ヶ月以上の連続通信を確認し、さらに継続している。

気象環境による 920MHz 通信への影響は、台風接近時に雨雲・降雨が大きく変化したにも関わらず、約 100km 離れた受信信号強度が影響を受けないことを確認した。

長距離受信実験では、321km 離れた場所でホイップアンテナと小型受信機による安定受信に成功した。

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観測データを低消費電力で長距離通信できる手段を提供することで、極地での環境科学の測定・研究に貢献することができる。

6. おわりに

本実験により、観測したセンサーデータの伝送と登山者位置把握の手段として活用できることがわかった。今回の通信実験で用いた IoT 向け無線技術の ELTRES は、2018 年に日本でプレサービスを開始した。今後は山岳や海上、上空など観測が難しかった場所の観測に活用して頂くことで、皆様の研究開発に貢献できたら幸いです。ご興味がある方はお気軽にお問い合わせください。宜しく願い致します。

7. 謝辞

本実験は、認定 NPO 法人「富士山測候所を活用する会」の皆さまのご協力により実現されました。貴重な機会を頂き、本当に有難うございます。改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) OplusE 2017 年 9 月号(第 454 号) IoT 向け、長距離・省電力無線伝送技術の開発
- 2) ETSI TS 103 357 Short Range Devices; Low Throughput Networks の Section 5: Lfour family として規格化
- 3) 気象庁 過去の気象データ検索 富士山 2019 年 1 月 26 日(10分ごとの値)
- 4) 平成 30 年 台風第 24 号に関する 神奈川県気象速報 平成 30 年 10 月 3 日(平成 30 年 10 月 24 日訂正) 横浜地方気象台

「理科準備室へようこそ」～富士山頂での教材開発 VII～

古田豊
NPO 法人ガリレオ工房

1. はじめに

富士山頂の環境を教育に活用する計画¹⁾の 7 年目、2018 年度の夏は西進台風 12 号による山頂での実働日数減のもと、8 月 10 日から 14 日まで非常時対応の教材開発事例を身の回りのものを使って実験器具の固定を工夫した。

災害等による避難先で、当面その場にあるものを利用して必要な仕掛けを手作りする。市販の各種製品は個々に目的用途があるが、個別用途のそれらを組み合わせることで新たな用途を生み出し代用する教材例である。旧富士山測候所の教育への活用例として、災害避難時の手作り器具作りを挙げる。

2. 理科実験教材から災害時対応教材へ繋げる工夫例

学校の理科実験用器具(鉄製スタンド)を用いず、ヘアドライヤーを上下可動させ固定も可能、送風口を上下双方の向きで使いたい。軽量球体の浮上実験に使う送風装置(以下ドライヤー)を固定する器具を組み立てた²⁾。

下向き送風時の固定法として、単行本を積み重ねて 2 列に並べ、幅広テープを巻いた円筒にドライヤーの送風口を挿し入れ、円筒で橋渡しした(図 1)。上向き送風時の固定法として、実験器具運搬に使用したプラスチックケースを 2 個並べ、割り箸で橋を渡し、上記の円筒にドライヤーの吸気口を載せて固定した(図 2)。

下向き送風時に台秤を押す力を計り、上向き送風時に軽量球体を浮上させ動きの特徴を掴む。



図 1 下向きドライヤー

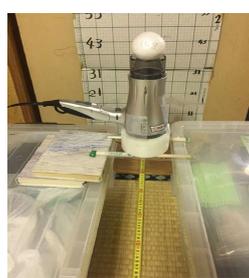


図 2 上向きドライヤー

3. 紙カップの落下運動記録比較

紙カップの自由落下運動を 1 秒 10 コマの多重露出撮影していたデータを検討した。紙カップはマドレーヌを作るアルミカップを仕切る紙を用いた(図 3)。富士山頂(標高 3,773m 付近)、富士宮口 6 合目(同 2,500m 付近)、立教新座高等学

校物理実験室(同 54m 付近)で落下させ、写真から 1 秒間の落下距離を読み取った(図 4-6)。1 秒あたりの落下距離は、上記の順に約 85cm, 約 60cm, 約 45cm であった。標高が高いほど時間当たりの落下距離が長く、どれも等速に見える。

多重露出写真から加速度が読み取れる物体を探し、標高の異なる空気中で比較すると、より多様に学べる教材となる。解析へ向けて諸条件を整える必要がある。



図 3 落下させた紙カップ



図 4 標高約 3,773m 地点



図 5 標高約 2,500m 地点



図 6 標高約 54m 地点

4. おわりに

理科実験教材の工夫を防災教材、災害避難先での手作り器具づくりの工夫に繋げる文脈を引き出すことができた。身の回りにあるものに部分的に手を加え、組み合わせしていく過程は、物理学の発想と学びの応用である。

本活用計画を支えてくださった方々にお礼を申し上げる。

参考文献・教育活動

- 1) 古田豊(2018). 富士山頂の環境を教育に活用する 自然から学ぶ実験教材の開発. 笹川化学研究助成の成果と期待 30 年にわたる若手研究者への支援, 55. (公財)日本科学協会
- 2) 古田豊(2018). 富士山頂での実験の工夫. NPO 法人ガリレオ工房通信, 365,7.
- 3) 古田豊(2018). 都内で自然体験 台風 20 号の気体感教材づくり. NPO 法人ガリレオ工房通信, 365,20.
- 4) 古田豊(2018). 富士山頂の自然を学ぶ理科実験の工夫. 第 2 回キャタリストフォーラムかがく屋台に出展. (公財)中部科学技術センター等主催. 2018 年 12 月 22 日 三重県総合文化センター

富士山におけるラドン濃度の変動と気塊由来の関係

横山慎太郎¹, 永野勝裕¹, 三浦和彦¹, 櫻井達也², 森樹大¹

1.東京理科大学, 2.明星大学

1. はじめに

富士山頂は年間を通して自由対流圏内に位置することが多く、その清浄大気や、東アジアからの越境輸送大気の観測サイトとして重要である。そして山頂の気塊はこれら以外にも日本国内由来や局地由来のものが存在し、いずれが優位な影響を及ぼしているかがこれまで研究されてきた¹⁾。しかし、その判別事例は少なく、更なるサンプルの検討が必要である。

そこで本研究では富士山頂で観測された、陸地由来の物質輸送のトレーサーとして有用な Radon222 (ラドン)²⁾ の濃度変動、アメリカ海洋大気庁提供の後方流跡線や Weather Research & Forecasting (WRF) の気象場シミュレーション、由来別にラドン濃度をシミュレーションした結果と比較して、新たに2011年8月の富士山頂の気塊由来について考察した。

2. 方法

観測場所は富士山特別地域気象観測所(35.36°N, 138.73°E:海拔 3776m, 以下山頂, summit)で、期間は2011年7月14日～8月24日である。

ラドン濃度の計測はSi半導体放射線検出器を用いて行った。大気中のラドン娘核種をフィルターに1時間捕集し、その後ラドン娘核種が α 崩壊する際の α 線を1時間計測、そのカウント数をラドン濃度に変換した。測定周期は4時間である。

ラドン輸送のモデルシミュレーションによって、大陸由来、日本由来の判別を行った。これは、ラドンが陸地から一様に発生していると仮定し、アジア大陸由来と日本陸部由来それぞれによるラドン濃度を算出するものである。解析には気象庁の0.5°メッシュの客観解析データを用い、ラドンの α 崩壊による減衰を見込んでいる。

また、WRFによる風向風速シミュレーションを実施した。WRFは気温、気圧、風向風速などの気象パラメータを数値解析するモデルで、本研究では5km, 0.5°メッシュの客観解析データを用い、それらをネステイングして1kmメッシュの富士山周りの風向風速データを得た。

3. 結果・考察

2011年8月8～19日の富士山頂で観測されたラドン濃度(実線)と由来別ラドン濃度(点線, 破線)のモデル計算結果の変動を図1に示した。

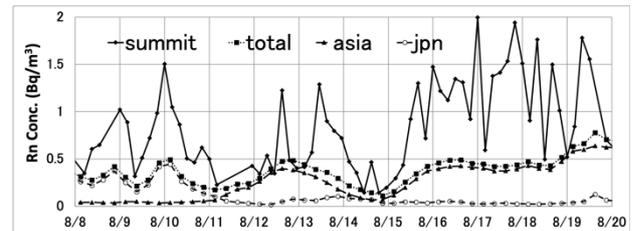


図1 富士山頂ラドン濃度実測値とシミュレーション値

観測値の80%以上がシミュレーションによる全由来のモデル計算結果を超えた。これはシミュレーションのメッシュが0.5°であることから、それ未満のスケールの気象現象を見込めないことに起因しており、実測値の超過分はモデルで再現できない局地由来の気塊の到達を示していると考えられる。

由来別ラドン濃度のモデル計算結果に注目すると、8月8～10日は国内由来の値の方が大きく、それ以外では大陸由来の値の方が大きい。その中でも、8日と9日は実測値が日中、そして日没後も上昇し夜間に極大値を取った。これは、日中は谷風による局地由来、日没後は中部山岳などの国内由来の影響が考えられる。先行研究⁽¹⁾では1例のみ確認されており、本研究でも同様の現象が起こっているかを以下で検討する。

まず、日中に谷風が発生しているかをWRFの解析結果を用いて検討する。図2は8月8日正午富士山まわりの水平方向の風向風速を示しており、全方位で山頂に向かって大気が輸送されていることがわかる。これは独立峰での典型的な谷風の様子を示している。また、図3は富士山まわりの鉛直方向の風速を示しており、山頂周りでは上昇気流が優位に発生していることがわかる。また、8月9日に関しても同様の傾向が見られ、2日間通して日中は谷風が発生しており、山頂に局地由来の気塊の影響があったことが考えられる。

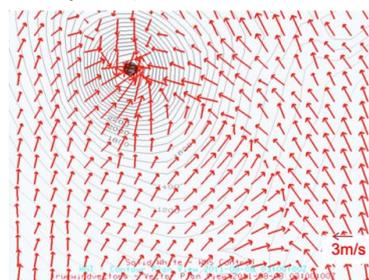


図2 WRFによる水平方向の風向風速解析結果
(8/8 12時, ●:富士山頂)

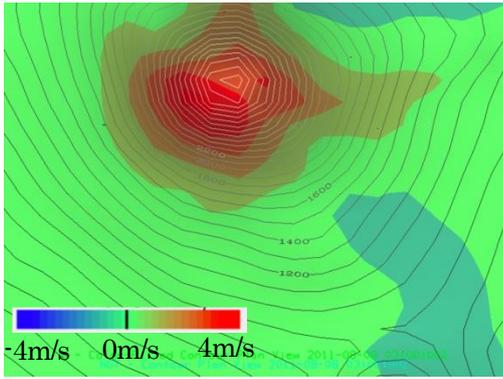


図3 WRFによる鉛直風解析結果
(8/8 12時, ●: 富士山頂)

次に、夜間に関して、富士山頂での後方流跡線を取ると8日21時は図4(左)のようになった。流跡線の原点の高度を約3,800mと1,300mの2種類を取っているのは、後方流跡線の元としている地形データがメッシュの粗さゆえに実際と異なるため、気塊輸送の経路に幅を見込むことが必要なためである。この流跡線から、8日21時の富士山頂での気塊は日中に富士山頂に対して西方の中部山岳や北方の奥秩父山塊を通過している可能性が示された。そして、図4(右)の8日15時におけるWRFによる鉛直風解析結果を見ると、中部山岳域で広く上昇気流が発生していることがわかる。また、9日についても同様の傾向が見られた。これらのことから、8日、9日の日中に中部山岳等で上昇した気塊が輸送され、夜間の富士山頂に到達したことが示唆された。

以上から、2011年8月8、9日の富士山頂において日中は谷風による局地的な輸送による気塊が影響してラドン濃度が上昇し、中部山岳で日中上昇した気塊がその後夜間に富士山頂に到達することでラドン濃度が上昇し続けたと考えられる。

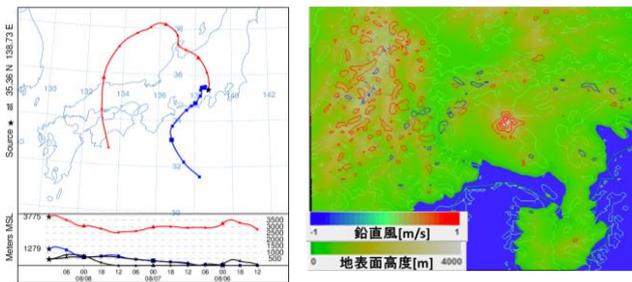


図4 (左) 8/8 21時の富士山における後方流跡線
(右) 8/8 15時の富士山まわりのWRF鉛直風解析結果

先行研究と合わせて、上記のような日中から夜間にかけてラドン濃度が上昇し続けるイベントは3例確認でき、それぞれの地上天気図を確認すると、いずれも本州全体が高気圧に覆われていた(うち1例を図5に示した)。雲が発生しにくく、夏の強い日射による気塊上昇が起りやすい本州山間部は、一般風が弱いため富士山頂に国内の陸部由来の気塊が到達しやすい環境となる。そのため、富士山や中部山岳等で日中に谷風による気塊上昇が発生し、山頂にそれぞれが時間差を持って到達したことが考えられた。

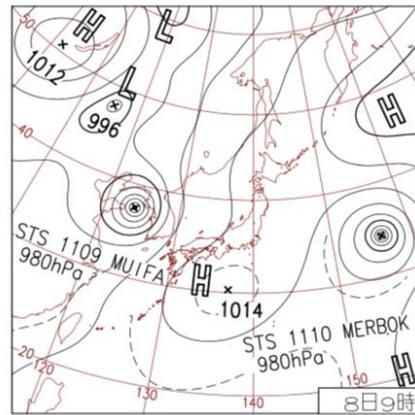


図5 2011年8月8日地上天気図(気象庁提供)

4. おわりに

本研究では、富士山頂の気塊由来について2011年8月のラドンの観測結果をもとに判別を試みた。8日と9日のシミュレーションでは日本国内由来が優位と示され、日中に加え日没後も実測のラドン濃度が上昇し続けるイベントが確認された。これは1例のみ確認されている、日中は谷風による局地的な気塊輸送、日没後は中部山岳等の国内山岳域からの気塊輸送の影響でラドン濃度が夜間に極大値を持つと言う先行研究と一致していた。

また、WRFによるシミュレーション結果と後方流跡線から、8日と9日いずれも先行研究と同様の気塊が日中と夜間で到達していたと考えられた。そして、3つの例の共通項として本州全体が高気圧に覆われることが挙げられ、国内・局地気塊が山頂に連続して到達する条件が示唆された。

参考文献

- 1) 府川明彦 東京理科大学大学院修士論文 2014年
- 2) Wilkening, M. H. and Clements, W. E. (1975).
Radon 222 from the ocean surface, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3828-3830.

富士山頂における新粒子生成の特徴と傾向

五十嵐博己¹, 佐藤丈徳¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 岩本洋子², 和田龍一³, 加藤俊吾⁴, 大河内博⁵
 1.東京理科大学, 2.広島大学, 3.帝京科学大学, 4.首都大学東京, 5.早稲田大学

1. はじめに

大気中において、前駆ガスが化学反応することにより核生成を起し、それに引き続き凝結成長することで微小粒子(粒径が数 nm~数十 nm) が生成する過程を新粒子生成(New Particle Formation; NPF) という。NPF で生成された粒子は、太陽光を直接散乱・吸収し直接効果を及ぼす。さらに、生成された粒子の一部が成長・変質し雲凝結核としての能力を持つことで、雲の放射特性にも影響を与える。以上のことから、NPF はエアロゾルによる気候影響を評価する上で重要な意味を持つ。しかし、新粒子生成やその後の成長のメカニズムは複雑で十分に理解されていないのが現状である。

そこで、本研究では富士山頂において自由対流圏や大気境界層上部を定点観測出来る他、アジア大陸などからの越境大気汚染を観測することが出来るという利点を活かし、2006年から2018年にわたる長期的な観測を行い、新粒子生成の経年変化や日変化について考察した。

2. 方法

2006年から2018年の夏季(7~8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.)で大気観測を行った。本要旨では、走査型移動度粒径測定器(SMPS)のTSI 3034を用いた2011年から2017年とDMA3081+CPC3775を用いた2018年の観測結果に着目する。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10~487 nm, 14~673 nm(2018年のみ)のエアロゾル粒子の個数粒径分布を3分毎に連続測定したものをを用いた。本研究では、粒径25 nm以下の粒子数濃度が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)。

NPFが発生した時刻の推定とイベント毎の特徴を調べるために、成長速度(Growth Rate, GR)を算出した(図2)。GRはイベント時の25 nm以下のモード径の経時変化のグラフに回帰直線を引きその傾きにより算出し、決定係数が0.6以上のものを有効な値として用いた。

イベント時の気塊の由来を調べるために、NOAA HYSPLIT 4 modelを用いた後方流跡線解析を行った。

また、イベントの特徴を見るためにM. I. Garcíaら¹⁾の分類表を改訂した表1を用いて分類を行った。分類は主にClass I, II, IIIとあり、それぞれ成長を4時間以上, 2~4時間, 1~2時間経験するものである。その中で、成長率などのパラメータを算出できるものをa, 出来ないものをbとした。

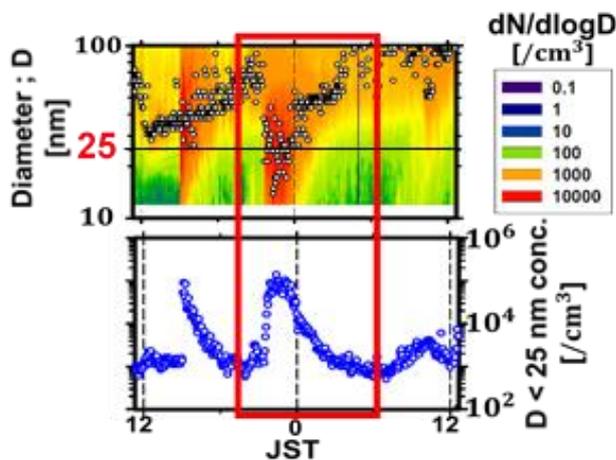


図1. 個数粒径分布とNPFイベント(四角で囲った範囲) 上図はモード径(同時刻における最大数濃度粒径)を示す

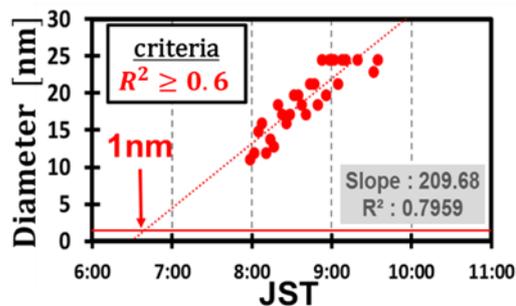


図2. 成長速度の算出の一例(上図●はモード径を示す)

表1. イベント分類表 (M. I. García et al, 2014¹⁾ 改訂)

Class	成長継続時間	特徴
I	a	25 nm以下の粒子が1時間以上存在し、成長が4時間以上観測される。モード径の成長が明確で、成長速度などのパラメータが導出できる。
	b	4時間以上 上記の条件を満たすが、成長にノイズが多く、成長速度などのパラメータを求められない。
II	a	25 nm以下の粒子が1時間以上存在し、成長が2~4時間観測される。モード径の成長が明確で、成長速度などのパラメータが導出できる。
	b	2~4時間 上記の条件を満たすが、成長にノイズが多く、成長速度などのパラメータを求められない。
III	a	25 nm以下の粒子が1時間以上存在し、成長が1~2時間観測される。モード径の成長が明確で、成長速度などのパラメータが導出できる。
	b	1~2時間 上記の条件を満たすが、成長にノイズが多く、成長速度などのパラメータを求められない。
Undefined	判別不可	25 nm以下の粒子が1時間以上存在するが、成長が見られない。または、25 nm以下の粒子が存在しないが、Aitken modeの粒子が成長する。
Non-event	イベント無し	25nm以下の粒子が存在しない。かつ、Aitken modeの粒子の成長が見られない。
Bad data	欠損	装置や観測上の問題でデータが使用できない。

3. 結果と考察

2011年から2018年までの観測日数に対する全イベント数を富士山頂における日の出・日の入時刻により、日中イベント(5~18時)と夜間イベント(19~翌4時)に分け、それらの回数・割合を調べた。この結果より、2014年を除いた2011年から2015年では夜間イベントが約6割以上みられ、2016年から2018年では日中イベントが約8割以上あることが分かった。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。

日中と夜間イベントの観測開始時刻の頻度分布を図3に示す。図3から、日中イベントは8時、夜間イベントは20~21時にピークを持つことがわかった。

イベントをクラス毎に判別した結果、Class Iが一番多い結果となった(図4)。主に日中イベントはClass I、夜間イベントはClass IIがそれぞれ多い結果となった。また、2013年から2018年に掛けてClass IIIが多くなっている傾向が見られ、微小粒子が長時間成長しづらい環境になってきていることが示唆された。それは、凝結に必要な前駆ガスの減少などが考えられる。

日中のイベントは主に光化学反応によりNPFが発生し、夜間のイベントは光化学反応以外のプロセスでNPFが起これらと考えられる。そこで、日中に生成された粒子が輸送されることで夜間にイベントが観測された可能性を考慮し、成長速度GRを算出し核生成された時刻を推定した。GRを算出した結果195回のイベント中40回のイベントで有効な値が得られた。GRは1.7~14.7 nm/hとなり、夜間(Median 4.6 nm/h)よりも日中(Median 6.0 nm/h)の方が約1.3倍大きいことがわかった。この40回のイベントについて、核生成が起こったとされる粒径が1 nmの時刻(NPFが発生した時刻)を推定した(図5)。これより、夜間に発生したNPFの割合は減少したものの日中・夜間ともにNPFの発生が示唆され、光化学反応とは別に日射が影響しない暗反応による新粒子生成も起きていることが示唆された。

4. まとめ

富士山頂における全イベントは、2011年から2018年の全観測期間256日中195回観測された。日中は8時、夜間は20~21時にイベント観測数のピークを持つことがわかった。またクラス分類を行った結果、Class Iが一番多く、日中イベントではClass I、夜間イベントではClass IIがそれぞれ多い結果となった。

GRは全195回のイベント中40回で有効な値を示し、1.7~14.7 nm/hとなった。また、夜間より日中のGRの値が約1.3倍大きいことがわかった。GRを用いたNPF発生時刻の推定を行ったところ、日中(80%)と夜間(20%)の両方でNPFが発生していることが示唆された。この結果から光化学反応と暗反応の両方でNPFが発生している可能性があることが示唆された。

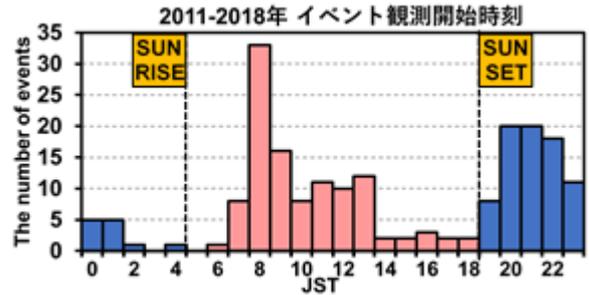


図3. 2011~2018年イベント観測開始時刻の頻度分布

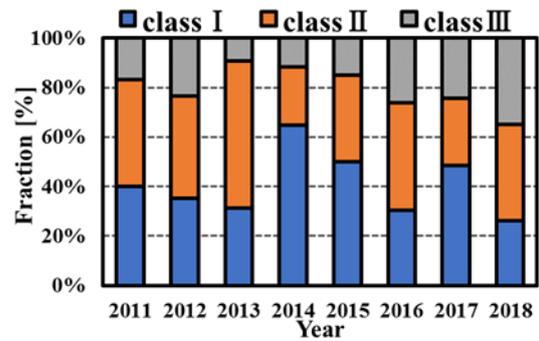


図4. 2011~2018年のイベント分類結果

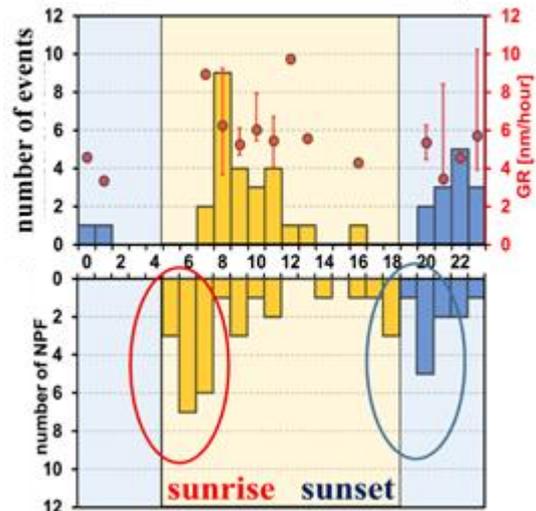


図5. 2011~2018年NPF発生時刻の推定結果
(上図:GRが算出できたイベントの時刻別発生頻度とGR)
(下図:GRから逆算したNPF発生時刻の推定結果)

5. 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。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

- García, M. I., Rodríguez, S., González, Y., García, R. D. (2014). Climatology of new particle formation at Izaña mountain GAW observatory in the subtropical North Atlantic. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 3865-3881.

富士山麓太郎坊における新粒子生成の経年変化

荻原大樹¹, 五十嵐博己¹, 佐藤丈徳¹, 桃井裕広¹, 山脇拓実², 森樹大¹, 三浦和彦¹, 大河内博²

1. 東京理科大学, 2. 早稲田大学

1. はじめに

エアロゾルは大気中に存在する微粒子のことで、粉塵、煙、ミスト、大気汚染物質などがあり、気候や人体へ大きな影響を及ぼす。エアロゾルには粒子が直接太陽光を吸収、散乱することで大気の放射強制力に影響を与える直接効果と、粒子が雲凝結核として雲を形成し、その雲によって間接的に太陽光を吸収、散乱させる間接効果がある。

このエアロゾルには生成過程の違いから分類することができ、海面から生成した海塩粒子や地上からの土壌粒子など粒子として大気中に放出されるものを一次粒子という。一方で、ガス状物質として放出されたものが、大気中で凝縮し粒子化して形成されるものが二次粒子である。そして二次粒子の前駆気体の種類によって、形成されるエアロゾルを分類することもでき、SO₂やNO_x、O_xが前駆気体である無機エアロゾル、揮発性有機化合物(VOC)を前駆気体とするものを有機エアロゾルという。

このような凝集、凝結を伴う二次粒子の生成過程を新粒子生成(New Particle Formation ; NPF)という。NPF により Nucleation mode (粒径約 25 nm 以下の範囲)のエアロゾルの個数濃度は大幅に増加し、生成された粒子の一部は雲凝結核に寄与する粒径範囲 (数十 nm～数百 nm)まで成長する。放射強制力を考慮する上で NPF は無視できないメカニズムであり、気候に重大な影響を与える。しかし、NPF やその後の成長メカニズムは多様な化学種が関与し多段階的な反応を経るため実験的・観測的な理解は乏しい。そのため様々な場所で大気観測を行うことが重要とされる。

本研究では、富士山麓太郎坊において 2014 年から 2018 年の夏季にエアロゾル個数濃度分布の観測を行った。

2. 手法

2.1 観測場所、装置

2014 年から 2018 年の夏季富士山麓太郎坊 (138.804E, 35.332N, 1290 m a.s.l.)においてエアロゾル個数

濃度分布を測定した。観測システムは、外気をインレットより吸引し、エアロゾルの湿度特性を考慮し相対湿度を 30%以下に維持するため拡散ドライヤーを通した。このとき、温度・湿度を確認するために拡散ドライヤーの下流に温湿度計測器 (HygroPalm3) のセンサーを設置した。拡散ドライヤーを通過した試料大気は微分型移動度分級器(Differential Mobility Analyzer; DMA)で粒子を分級後、凝結粒子計数器 (Condensation Particle Counter; CPC)にてエアロゾル個数濃度分布を測定した。(図 1)

2.2 新粒子生成(NPF)イベントの定義

イベントの発生を判断する際の基準として以下の定義を設けた。

- [1] 25 nm 以下の粒子が 1 時間以上存在し、成長を伴うもの
- [2] 粒子数の高濃度状態が 1 時間以上継続するもの

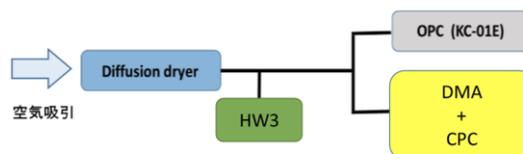


図 1 富士山麓太郎坊における観測装置概要

3. 結果と考察

図 2 に 2014 年から 2018 年における富士山麓太郎坊での NPF イベント発生率の月別推移を示す。

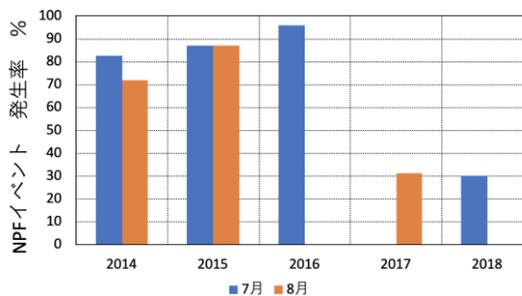


図 2 NPF イベント発生率の月別推移

図から 2017 年以降に NPF イベントの頻度が極端に減っていることがわかる。

イベントの発生要因として、そらまめくんで観測している富士山麓周辺の市街地からのSO₂などの無機エアロゾルの前駆気体が谷風によって輸送される(大塚,2017)と示唆されていたが、太郎坊周辺の市街地である御殿場市での 2014 年から 2018 年の同時期における前駆気体濃度に大きな変化はなかった。

例として 2014 年と 2018 年の SO₂ と O_x 濃度の比較図を示す。

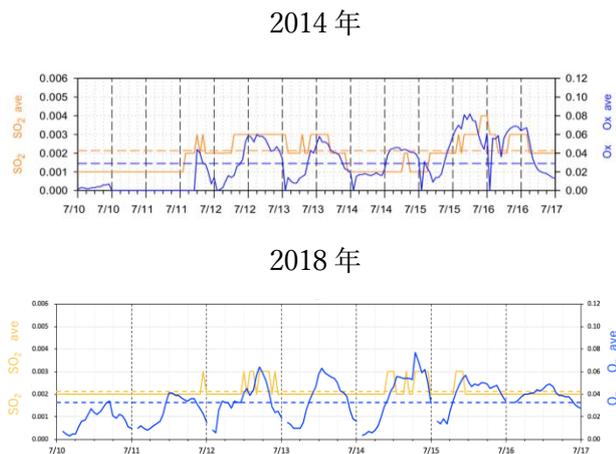


図 3 御殿場市で測定した 2014 年と 2018 年の

SO₂・O_x濃度比較

しかしながら、御殿場市観測局と富士山麓太郎坊には約 13km の距離があり、富士山周辺の地形的や市街地の建造物の遮蔽によって、前駆気体が確実に輸送されている明確な証拠はない。

そこで本研究では、太郎坊と距離が近く建物や地形による影響を受けない植物起源揮発性有機化合物(BVOC)に焦点をおいた。

早稲田大学大河内研究室から BVOC の濃度データを提供していただき、25 nm 以下の粒子数と比較した。

日中での BVOC の大半を占めるイソプレンとは 800 pptv 程度までは正の相関が、それ以降は負の相関が見られた。⁽¹⁾ また夜間ではイソプレンの放出が減少するため、モノテルペン 5 種(α -pinene, myrcene, β -pinene, delta-carene, limonene)との比較を行った。

結果はイソプレンよりも明瞭な正の相関が見られた。

要因として夜間は日中に比べ、山谷風によるその他前駆気体の影響を受けにくいことが考えられる。⁽²⁾

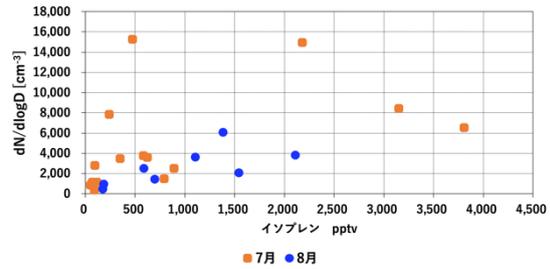


図 3 2014 年から 2018 年のイソプレン濃度と粒子数濃度の関係

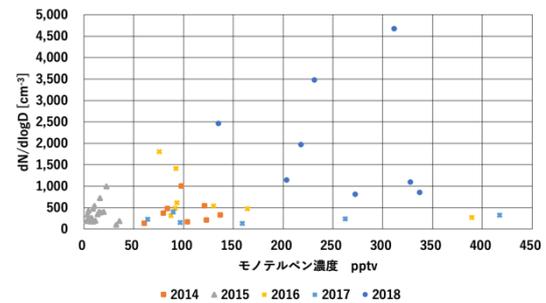


図 4 2014 年から 2018 年のモノテルペン濃度と粒子数濃度の関係

4. まとめ

2014 年から 2018 年での富士山麓太郎坊での新粒子生成の経年変化の解析を行った。

その結果、2017 年以降 NPF イベントの極端な減少していることがわかった。御殿場市における無機エアロゾルの前駆気体濃度には変化がない一方で、有機エアロゾルの前駆気体である BVOC 濃度は日中、夜間共にイベントとの相関が見られた。

謝辞

本研究は早稲田大学大河内研究室から揮発性有機化合物の観測データを提供のもと行われました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Tunved, P., et al, High Natural Aerosol Loading over Boreal Forests, Science, 312, 261-263(2006)
- 2) Jung J., et al., Atmos. Chem. Phys., 13, 51-68, 2013

富士山頂・太郎坊で捕集したエアロゾル粒子の個別分析

市毛友彬¹, 吉末百花¹, 足立光司², 五十嵐博己¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹

1. 東京理科大学, 2. 気象研究所

1. はじめに

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して働き雲を形成する間接効果を通して気候に影響を及ぼす。しかしながら、エアロゾル粒子の気候影響は、化学組成や形状、混合状態によって変化するため、粒子個々の特性を明らかにすることが重要である。特に、ブラックカーボン粒子(BC)は化石燃料や植物由来燃料、バイオマスバーニングなどの不完全燃焼によって発生する炭素質のエアロゾルである。また、二酸化炭素、メタンに次ぐ正の放射強制力を持ち、光の吸収量が混合状態により変化することが知られている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 0.5 L/min に設定し、60 分間捕集した。また、太郎坊では流量を 0.85 L/min に設定し 10~15 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(2018/7/14 21:00, 22:00)と太郎坊において捕集された 3 サンプル(2018/7/20 16:00, 2018/7/21 12:00, 16:00)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+鋳物, 海塩, 海塩+鋳物, 変質海塩, 変質海塩+鋳物, カリウム塩, カリウム塩+鋳物, 鋳物, その他の 11 種類に分類した。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が約 40%以上を占めていた。また、太郎坊のサンプルと比較すると変質海塩の割合が高く、全体の約 20%を占めていた。後方流跡線解析より山頂の 2 サンプル共に東シナ海, 朝鮮半島を通過し, 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が多く、粒子全体の約 50%以上を占めていた。後方流跡線解析より太郎坊の 3 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。

山頂と太郎坊の両サンプルともに硫酸塩の割合が高かった。しかしながら、BC との混合状態が異なったため、セクション 3.2 にて考察する。

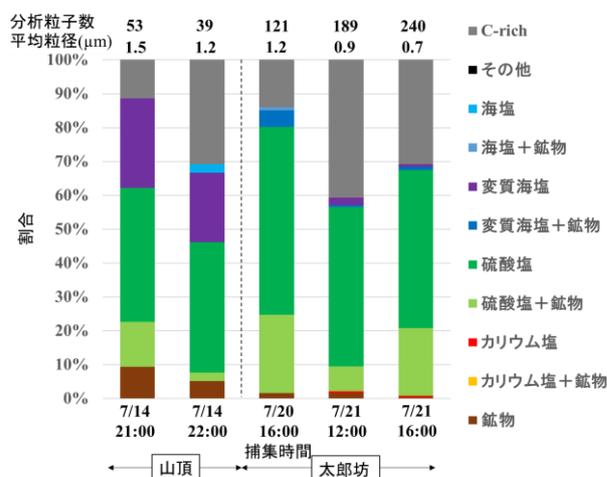


図 1 山頂・太郎坊の粒子分類結果

3. 2 BC の混合状態の比較

山頂(7/14 21:00)と太郎坊(7/21 12:00)で捕集した微小粒子の TEM 写真を図 2 に示す. 組成分析のために EDS を用いて粒子に電子線を照射すると揮発性粒子が揮発し, 粒子の内部混合について観察できる. 山頂において捕集された粒子のほとんどは BC との混合が確認されなかったのに対し, 太郎坊で捕集された粒子の多くは BC と混合していた.

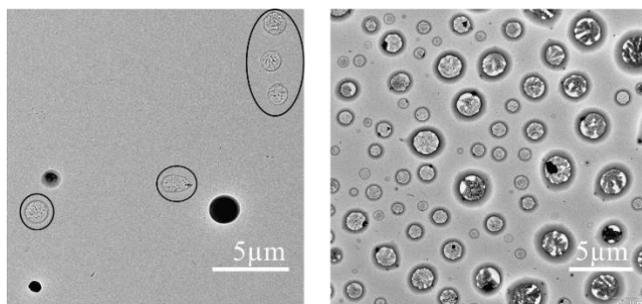


図 2 EDS 分析後の TEM 写真
左:山頂(○:揮発した粒子)右:太郎坊

本研究では, BC の光吸収量が粒子の混合状態によって変化することを踏まえ, BC の混合状態について分類を行った.

先行研究^{1,2)}によると BC が単体で存在する Bare の光吸収量を 1 とすると, BC が他の粒子の内部に存在している Coated type は最大約 2 倍, BC が他の粒子に付着している Attachment type は 1~1.1 倍光吸収量が増加すると言われている. 図 3 にそれぞれの混合状態の例を示す.

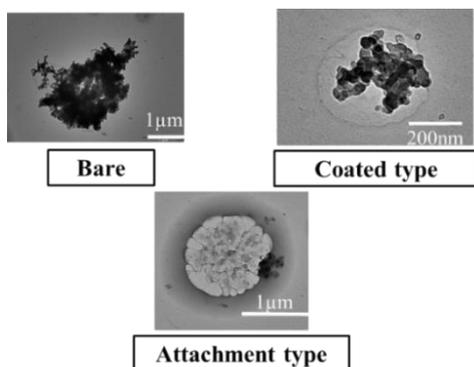


図 3 BC 混合粒子の例

太郎坊の 3 サンプルに対して BC の混合状態を上記の 3 タイプに分類した結果を図 4 に示す.

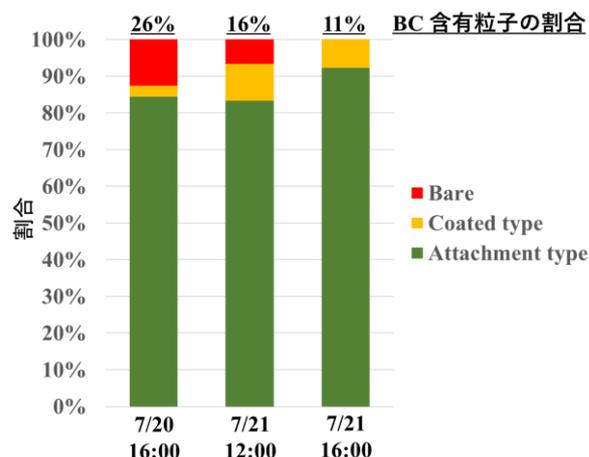


図 4 BC 混合状態の分類結果

太郎坊の 3 サンプル中に存在する BC の約 80%以上は Attachment type で混合していた. また, 後方流跡線解析の結果, 山頂で採取した気塊は日本上空の自由対流圏を通過後, 山頂に到達したのに対し, 太郎坊で採取した気塊は日本上空の大気境界層を通過後, 太郎坊に到達していた. したがって, 日本上空通過時の高度差によって BC との混合状態に大きな違いが生じた可能性が示唆された.

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. 特に太郎坊では山頂に比べて, BC と混合した粒子が多いことが分かった. また, 太郎坊における BC の混合状態は Attachment type が約 80%以上を占めていた. 後方流跡線解析によって, 日本上空通過時の高度によって BC との混合状態に違いがみられた可能性が示唆された.

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ました.

参考文献

- 1) Adachi, K., *et al.*, (2010). *J. Geophys. Res.*, 115.
- 2) Adachi, K., *et al.*, (2013). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3723–3730.
- 3) <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

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

乾諒介¹, 桃井裕広¹, 森樹大¹, 三浦和彦¹, 矢吹正教², 青木一真³

1.東京理大, 2.京都大, 3.富山大

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散乱・吸収する直接効果と雲凝結核として雲の放射特性や寿命を変化させる間接効果によって、地球の放射収支を変化させ、気候に影響を及ぼすことが知られている。しかし、放射強制力の大きさに関する見積りは未解明な部分が多く存在する。

本研究では、2018年夏季における山岳域でのエアロゾル粒径分布と散乱・吸収係数のその場観測から、エアロゾルの体積粒径分布及び単一散乱アルベド(SSA)の推定を行うため、プログラムを作成し、観測データを解析した。

2. 方法

富士山頂(138.73E, 35.36N, 3776 m a.s.l.)及び山麓(138.80E, 35.33N, 1290 m a.s.l.)においてエアロゾルの粒径分布、散乱・吸収係数を計測した。観測期間は2018年7月20日から7月22日である。

試料大気は拡散ドライヤーを通して相対湿度30%以下に乾燥させ、観測装置に導入した(図1)。観測装置は粒径ごとのエアロゾル数濃度を計測する光散乱式粒子計数器(Rion, KC-01E, OPC), 散乱係数(b_{sca})を計測する積分型ネフェロメータ(Radiance Research M903, $\lambda = 530$ nm, INEP), 吸収係数(b_{abs})を計測するフィルター式光吸収計(Radiance Research, $\lambda = 565$ nm, PSAP)である。OPCの閾値粒径は標準粒子(PSL, $m^* = 1.595 - 0i$)によって校正され、その粒径は、 $r > 0.15, 0.25, 0.5, 1.0, 2.5 \mu\text{m}$ である。また、INEPは構造上、計測される散乱角に $7^\circ \sim 170^\circ$ の角度制限がある。PSAPの上流ではマントルヒーターを用いて試料大気を 300°C に加熱することで光吸収性粒子のみを捕集した。

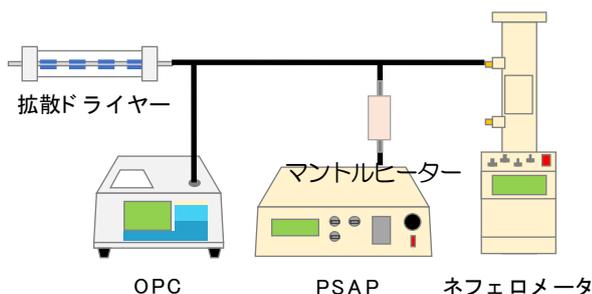


図1 装置配管概要図

エアロゾルの体積粒径分布とSSAを推定するにあたり、工藤ら(2017)¹⁾と同様にエアロゾルの化学組成は4種類とし、微小モードに水溶性粒子とすす粒子、粗大モードに海塩粒子と鉱物粒子を仮定した(図2)。エアロゾル数濃度、散乱・吸収係数の計算値をGauss-Newton法を用いて観測値に最適化することでエアロゾルの体積粒径分布とSSAを推定する手法を考案した。

推定されたSSAについて6時間ごとの体積粒径分布及び各組成の消散係数から富士山におけるエアロゾル光学特性の時間的・空間的な変化を考察した。

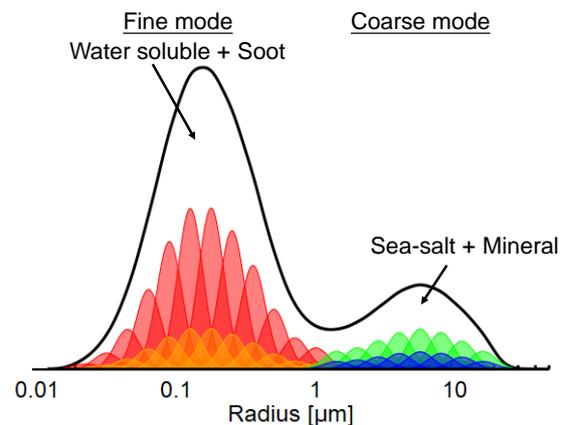


図2 組成ごとの粒径分布の概念図

3. 結果・考察

富士山頂と山麓のデータを用いてエアロゾル組成とSSAの推定を行った結果を図3,4に示す。データはOPCの3分値に合わせ、3分平均して求めた。また、解析をするにあたり、正常に計測が行われていなかった期間、及び明らかな外れ値についてはデータのスクリーニングを行った。各点の値は6時間平均して求めた。

推定の結果、山頂では消散係数割合で水溶性粒子が78%、次いですす粒子が12%、鉱物粒子が10%であり、山麓では水溶性粒子が84%、すす粒子が10%、海塩粒子が4%を占めていた。また、SSAは山頂においては20日深夜から21日15時頃にかけて低下し、その後上昇しており、平均値は0.89程度であった。山麓においては20日深夜から21日9時頃にかけて上昇し、9時頃から18時頃にかけて低下、その後上昇傾向がみられ、平均値は0.92程度であった。

次に、体積粒径分布の時間変化(図5,6)を見たところ、日中の粗大粒子の増大が見られたが、登山客による地表面か

らの巻き上げの可能性が示唆された。また、山麓においては22日に微小粒子が大きく増大していた。

次に、化学組成の時間的な変動がSSAに与える影響を調べるため、今回は微小粒子について着目し、その消散係数とSSAの時間変化を比較した(図7,8)。山頂では、すす粒子の消散係数が増大した21日午前にはSSAは0.91から0.85まで低下していた。また山麓では20日深夜から21日において水溶性粒子の消散係数が増大しており、SSAは0.87から0.93まで上昇していた。以上より、すす粒子や水溶性粒子の時間的な変動がSSAの値に影響を与えていたことが示唆された。

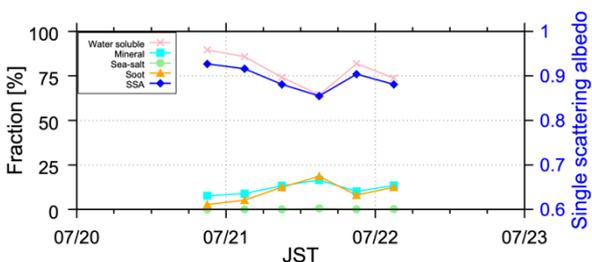


図3 山頂における推定結果

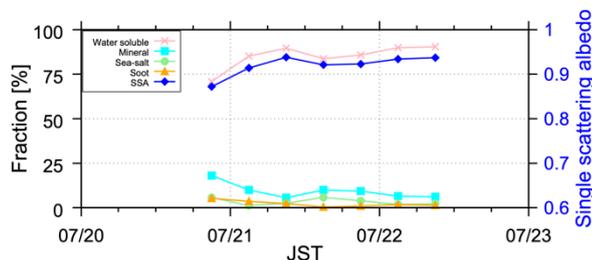


図4 山麓における推定結果

4. まとめ・今後の展望

富士山頂及び山麓でOPCとネフェロメータ、PSAPを用いてエアロゾル粒子数濃度、散乱・吸収係数を計測した。次に、得られた観測値から体積粒径分布、単一散乱アルベド(SSA)を推定するプログラムを開発した。推定する化学組成は水溶性粒子、すす粒子、海塩粒子、鉱物粒子の4種類とし、推定の結果、山頂では水溶性が78%、すす粒子が10%を占め、山麓では水溶性が84%、すす粒子が12%を占めていた。また、推定されたSSAは山頂では0.71~0.96で平均値は0.89程度、山麓では0.81~0.97で平均値は0.92程度であった。

消散係数の時間変化から、21日山頂におけるSSAの低下(0.91→0.85)は、すす粒子の消散係数の増大の影響が示唆された。また山麓においては20日夜から21日午前にかけてのSSAの上昇(0.87→0.93)は水溶性粒子の消散係数の増大の可能性が示唆された。

今後、推定された組成割合と同期間に富士山頂及び山麓で行われた別の化学成分の分析結果と比較する。

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。また、本研究に用いたPSAPは国立極地研究所の塩原先生よりお借りいたしました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 工藤ら(2017). SKYNET データによるエアロゾル組成のリモートセンシング, 2017年度気象学会秋季大会予稿集, 大気放射 A411, p499

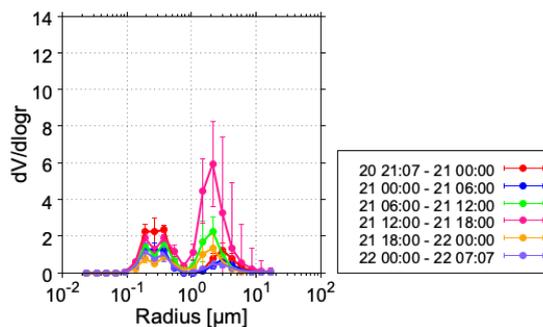


図5 山頂における体積粒径分布

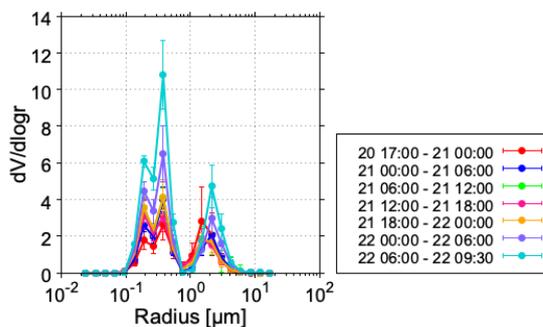


図6 山麓における体積粒径分布

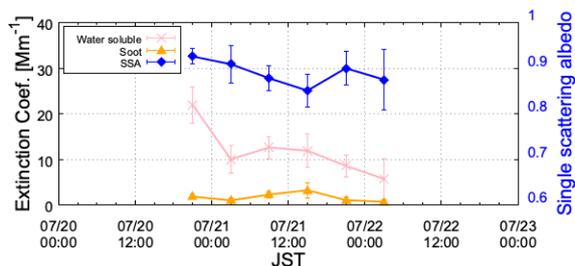


図7 山頂における消散係数とSSA

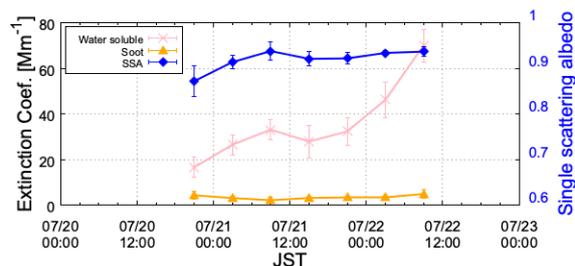


図8 山麓における消散係数とSSA

富士山頂におけるナノ粒子の粒子径分布計測

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。大気エアロゾルは、太陽光を散乱・吸収、さらに雲凝結核としても作用するため、地球の気候変動に重要な影響を及ぼすと考えられている。

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、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:TSI Inc. Model3085)と凝縮核計数器(CPC:TSI Inc. Model3776)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。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(DIONEX DX-120)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2018年7月12日から8月22日まで、富士山特別地域気象観測所(35.21°N, 138.43°N)で行った大気試料は10 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、1日あるいは約10日間のサンプリングを行った。回収後のフィルターを超純水に浸し、超音波洗浄器にかけることで水溶性成分を抽出し、その溶液をろ過してイオンクロマトグラフィーによって化学成分分析を行った。

3. 測定結果と考察

3.1 粒子径分布

図2に2018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。赤いスジ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、2016年(7/14~8/23)には15回、2017年(7/15~8/24)には21回、2018年には16回観測できた。

3.2 イベントの分類

次に粒子生成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結果を示す。まず、イベントの発生した時間帯を6:00~12:00を午前、12:00~18:00を午後、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 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、その他で分類した。2016年の粒子生成イベントは、午後に多く発生し、海洋由来のものが多かった。2017年のイベントはほとんどが午前中に発生し、大陸由来のものが中心であった。これに対し、2018年のイベントでは、午前、午後の両方で観測できたが、夜間は少なかった。また、空気塊については大陸由来のものがほとんどであった。

3.3 イベント時の種々パラメータの日変化

図3に2016年から2018年までの粒子生成イベントが発生

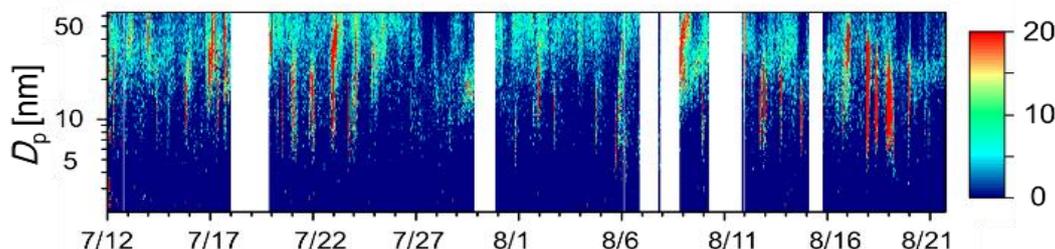


図2 粒子個数濃度のカウンタープロット (2018年)

した日と粒子個数濃度の上昇が無かった日において水蒸気混合比、3~25 nm の粒子個数濃度、オゾン濃度の平均値を横軸に時間、縦軸に各パラメータの値を表している。イベント時が青で、イベントのない日を赤で示した。

水蒸気混合比とは、乾燥空気に対する水蒸気量を表しており、下層から空気塊が来た場合は大きくなり、上層から空気塊が来た場合は小さくなるといわれている。各年においてイベント発生時の水蒸気混合比はイベントのない日に比べて高くなっている。つまり、下層から空気塊が到達しているときに多くのイベントが発生していると考えられる。また、3~25 nm の粒子個数濃度が上昇している時間帯は主に日中であり、その時間帯に水蒸気混合比も上昇している。これは、日中にかけて吹く谷風の影響を受けていると考えられる。オゾン濃度については、2018 年はイベント発生日のオゾン濃度が高くなっている。このことから、2018 年のイベントには、汚染空気も関係していたことがわかる。

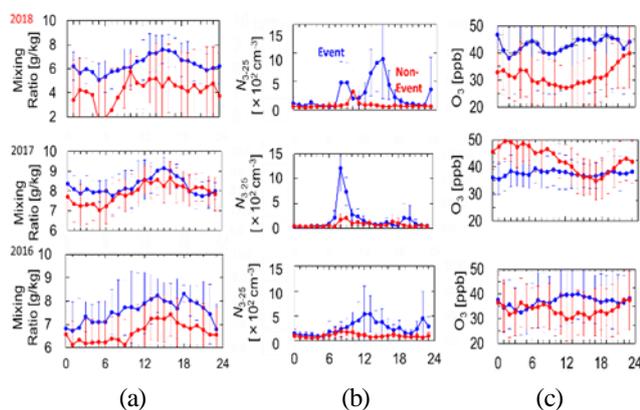


図3 種々パラメータの日変化 (a) 水蒸気混合比, (b) 3~25 nm の粒子個数濃度, (c) オゾン濃度 (上から2018年, 2017年, 2016年)

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にナノサンプラーにおけるポンプの稼働時間を示す。それぞれ1日から最大10日間という長期サンプリングを行った。図4にイオンクロマトグラフによる化学分析におけるイオン当量濃度についての結果を示す。まず、PM₁₀、PM_{2.5}のステージで捕集された比較的粗大粒子に対する各期間における各成分の値は同じような割合を示した。次に、PM_{1.0}、PM_{0.5}、PM_{0.1}のステージで捕集されたものについて、1日サンプリング(NO.2, 3)において硫酸イオンの割合が低く、長期サンプリングでは割合が高くなっていることから、硫酸イオンはフィルターに蓄積されていることが考えられる。また、PM_{0.1}のステージで捕集されたものは、各期間においてアンモニウムイオンの割合が高くなっている。最後にバックアップフィルターで捕集されたものにおいて、NO.5の期間の硫酸イオンの割合が異常に高くなっている。このNO.5の期間の各ステージにおけるイオン当量濃度もほかの期間と比べると全体的に高くな

っている。この期間には、台風が最も接近した時期と重なっており、谷風などにより吹き上げられた土壌物質の影響を受けたことも考えられる。

表1 ナノサンプラーポンプ稼働時間

	Start	Stop	ポンプ稼働時間 [min]
No.1	7月12日16時30分	7月20日10時5分	11135
No.2	7月20日11時56分	7月21日7時56分	1200
No.3	7月21日11時	7月22日7時	1200
No.4	7月22日7時45分	7月27日10時16分	7351
No.5	7月27日11時	8月6日10時39分	14379
No.6	8月6日11時28分	8月14日10時11分	11443
No.7	8月14日10時58分	8月22日9時40分	11442

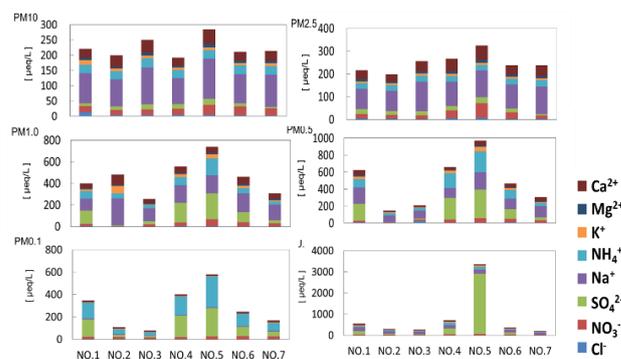


図4 イオンクロマトグラフによるナノサンプラー各ステージで捕集した微小粒子の化学分析結果

4. おわりに

2018年のイベントは主に日中に観測され、大陸由来のものが中心であった。また、イベント発生日の水蒸気混合比が上昇していることが分かった。福江島でのイベントの観測では5 nm以下の粒子径から始まるのに対し、富士山頂での各イベントは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生成し、ある程度成長した粒子が観測できていたと考えられる。

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は2.5 μm以下の粒子において各期間におけるイオン当量濃度の差がみられた。しかし、粗大粒子においてナトリウムイオンの割合が異常に高いなどの問題がある。今後、導入予定の新たなイオンクロマトグラフィーで再度、水溶性イオンの分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) Indra *et al.*, Current situation of atmospheric nanoparticles in Fukue Island, Japan, *Tellus B Chemical and Physical Meteorology*, 70:1, 1-12, (2018)

2018年富士山頂における窒素酸化物の計測

和田龍一¹, 林航平¹, 定永靖宗², 加藤俊吾³, 島田幸治郎⁴, 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.東京学芸大, 8.農研機構, 9.名古屋大, 10.気象研, 11.埼玉県環境科学国際センター

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)の計測が行われた. 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.

2. 方法 富士山特別地域気象観測所にて, 2018年7月15日~8月21日にNO, NO_y 濃度を, 2018年8月15日~21日に NO_2 濃度の計測を行った. NO_y 濃度の計測は, 市販のMoコンバータ化学発光分析装置(Thermo Fisher Scientific, model 42i-TL)を改良して用いた. 装置の校正は, NO標準ガスとゼロガス発生装置を用いて, 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

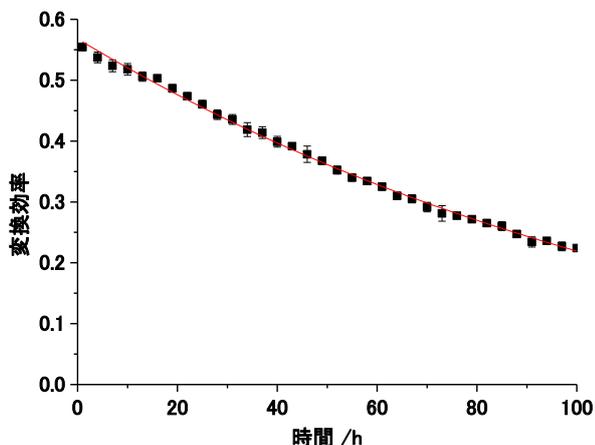


図1. 光分解コンバータ変換効率の時間変化

は開発した光分解コンバータに大気試料を通し, LED光(Focuspe社, 390nm)を5分毎にON/OFFすることで計測

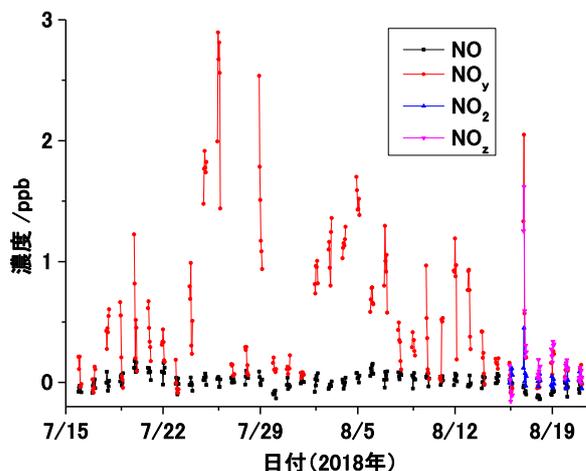


図2. 2018年夏季富士山頂で観測した窒素酸化物濃度(NO , NO_y , NO_2 , NO_z 濃度)

した. NO_2 の光分解効率を, NO_2 標準ガスを富士山頂および実験室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2号庁舎西側斜面に設置した.

3. 結果と考察 実験室で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. 変換効率は使用開始時には0.55であったが, 時間とともに変換効率は減少し, 100時間後には0.22となった. 開発した光分解コンバータを用いた NO_2 測定可能時間は100時間程度であることが分かった. 富士山頂で観測したNO, NO_y , NO_2 および NO_z 濃度の観測結果を図2に示す. 図2には観測期間中の夜間(21:00-3:00)のデータを示した. 2号庁舎西側にて大気サンプリングを行ったところ, 昼間にNO, NO_y のピークを与える明瞭な日変化が観測され, 人為的な影響を受けている可能性が考えられたことから夜間のデータを用いることとした. 富士山頂にて観測された夜間のNO, NO_y 濃度はそれぞれ最大0.19 ppb, 2.98 ppbであった. NO_2 濃度は検出下限以下(0.14 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, 2018年夏季富士山頂におけるNO, NO_y , NO_2 , NO_z の濃度変動を明らかにした.

富士山頂の大気粒子や雲水中の極性有機化合物の検出

戸田敬¹, 光石夏澄¹, 佐伯健太郎¹, 竹内政樹², 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

これまで、揮発性有機化合物の気相/粒子間の相間平衡や粒子内濃度の推移についてはあまり検討されてこなかった。その物質が粒子内に安定に留まらず、サンプリングの際に揮散してしまうからである。その課題を解決するために wet denuder (WD) と particle collector (PC) による連続的な捕集を試みた。もともと、無機系の酸性塩基性気体ならびに粒子中の無機塩類を捕集するために開発されたデバイスであるが、極性の高い有機化合物についても利用できることが分かってきた。そこで、富士山頂の大気について、比較的 low molecular weight の極性化学物質が粒子に入っているかどうか、確認を行った。また、雲水についても分析を行い、粒子と雲水での違いについて検討した。

2. 実験

WDにて気体成分を取り除いたあと、PCにて粒子に含まれる化合物を抽出した。WD, PC の各デバイスを通した捕集溶液を、フラクションコレクターにて1時間毎に採取し、必要に応じ誘導体化した。雲水については、NPOの方々に採取と誘導体化を依頼した。研究室に試料を持ち帰った後ただちに HPLC-MS/MS にて各成分の分析を行った。

3. 結果と考察

大気粒子のジカルボニル

気体成分ばかりでなく粒子からもジカルボニル類である glyoxal (Gly), methylglyoxal (Mgly) が検出された。これは昨年¹とほぼ同じような結果であった。そのほか formaldehyde

(HCHO), acetaldehyde (CH₃CHO), acetone (Ace) も検出されたが、ブランク値が高く、これらの濃度については疑わしいところもあった。

雲水のジカルボニル: 雲水について調べてみると、雲水からも Gly, Mgly のジカルボニル類が検出された。その濃度は Fig. 1 の通り大きく変動したが、気団の起源やルートによってその影響を受けている傾向がみられた。気団が中国大陸北部から到来した際は、多くの雲水で sub- μM オーダーの Gly や Mgly が観測された。一方、太平洋からの気団の際は、0.01 μM 程度であった。このような傾向は粒子内のジカルボニル類にも言えることであったが、本来これらの化合物の大気寿命は 1~3 時間と言われている。中国大陸で生成したジカルボニル類が富士山まで安定に存在し到来しているとは言いにくい。高層大気ではラジカル濃度が低く、寿命が長くなっていることも考えられるが、富士山近くで二次的に生成している可能性もある。その際大陸起源の残留有機物の影響が大きいかもしれない。例えば、燃焼時に発生するアセチレンは比較的寿命が長く、また光化学酸化を受けることによってジカルボニルになることが知られている。

気相と吸湿性粒子・雲水との間の相間平衡: ジカルボニル類の気相濃度および粒子状の濃度(ともに ng/m^3)をもとめた。さらに、吸湿性粒子を構成する水分量を熱力学的に求めると吸湿性粒子内のジカルボニル類のモル濃度をもとめることができる。粒子内モル濃度と気相濃度より、吸湿性粒子と気相との間の気液平衡について議論すると、みかけのヘンリー定数

July 25 – Aug. 22, 2018

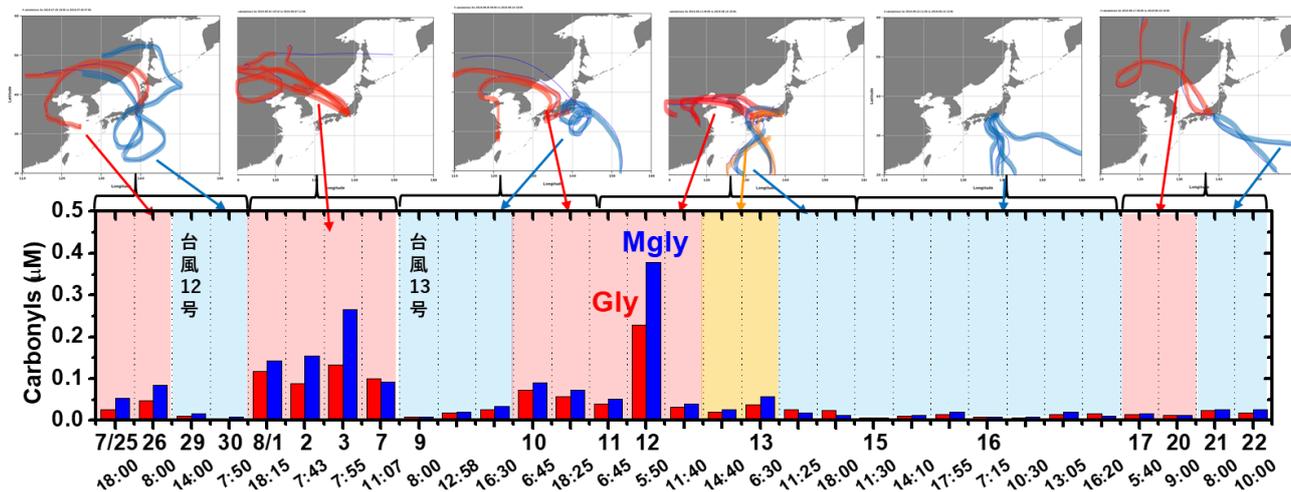


Fig. 1 Glyoxal (Gly) and methylglyoxal (Mgly) observed from cloud water sampled at Fuji summit.

$\text{eff}K_H$ は $4.1\sim 4.2\times 10^9 \text{ mol/kg}^{\text{water}}/\text{atm}$ となった。この値は熱力学的なヘンリー定数 K_H° と比べると $10^4\sim 10^6$ 程度も大きかった。このように大きな値は、吸湿性粒子が理想溶液とは大きく異なることなどからは説明できない。ターゲットとした物質は DNP_H で誘導体化して測定したが、カルボニルのオリゴマーやポリマーも同様にモノマーとして測定されることがわかった。従って、粒子内で重合したカルボニルも測定していたことになる。すなわち、 $\text{eff}K_H/K_H^\circ$ はオリゴマー化の度合いを表わす指標と言える。雲水については、直接水の中の濃度を測定できるため、その濃度の値で直接気液平衡について論ずることができる。雲水の場合は、 $\text{eff}K_H < K_H^\circ$ の関係となり、気液平衡にも達していないことがわかった。このように、吸湿性粒子と雲水とでは、その気液平衡や分配の状況が大きく異なっていることが分かった。

雲水のイミダゾール類： 2018 年はイミダゾール類についても測定を行った。湿性粒子内は高濃度のアンモニアが存在し、カルボニルとアンモニアが反応してイミダゾールが生成するとして、フラスコ内での実験結果がいくつか報告されている。²⁾ 今回 WD や PC の吸収液中のイミダゾールを測定したが、吸収液で希釈しているため、富士山の気相・粒子の吸収液試料からは検出されなかった。ただし、雲水からいくつかのイミダゾール類が検出された。特に imidazole-2-carboxyaldehyde がメジャーなイミダゾールとして顕著にみられた。これは熊本のフィルター採取ではほとんど検出されな

い物質であり、この点も興味深い。また、知る限り、雲水からイミダゾールを検出した例は報告されていない。イミダゾールが雲水中で生成するのか、気相や微小粒子で生じて雲水に取り込まれるのか、その機構についても検討を要する。

4. おわりに

以上のように、大気粒子や雲水から揮発性かつ極性の高いジカルボニル類を中心に検出することができた。気相濃度も測定したため、気相/粒子相間の平衡や粒子内での可逆的な部分のオリゴマー化ポリマー化について議論することができた。また、これらカルボニル類からの生成物と考えられる hydroxymethanesulfonate やイミダゾールを検出することができた。自由対流圏での雲水でイミダゾール類が見つかったことはたいへん興味深い。

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.

自由対流圏高度における水溶性酸性ガス及び粒子状物質の連続分析 2018

並川 誠¹, 岡本和将¹, 小田達也¹, 大河内博², 戸田 敬³, 田中秀治¹, 竹内政樹¹

1.徳島大学, 2.早稲田大学, 3.熊本大学

1. はじめに

大気中には粒子状物質(PM)と呼ばれる微小な物質が浮遊しており, 粒子径が小さい PM_{2.5} は気道に深く入り込み, 肺のガス交換領域まで浸透する. 一方, 水溶性酸性ガスは鼻粘膜に対する刺激症状, 呼吸器系の炎症等を引き起こし, 気管支炎や肺気腫などの原因となる¹⁾. これらの大気汚染物質は気象条件等によりガス状物質から PM へあるいは逆の相変化が短時間で起こるため²⁾, その実態を解明するためには両者を同時に高時間分解観測することが望ましい. そこで本研究では, 高時間分解観測が可能な水溶性ガス捕集器(ウエットデニューダー)³⁾と PM 捕集器(パーティクルコレクター)⁴⁾を自作し, それらを富士山頂における大気観測に適用した. 富士山は孤立峰であり, その頂は自由対流圏高度に位置するため, 富士山頂は越境大気汚染物質の観測に適したプラットフォームである.

2. 実験

2018年7月19日から23日の間, 富士山頂(3,776 m)に位置する富士山特別地域気象観測所において, 大気中水溶性ガスとPMを1時間毎に捕集した. 大気サンプルは3 L min⁻¹で吸引し, 拡散係数の大きな水溶性ガスのみがウエットデニューダーで捕集される. 一方, 拡散係数の小さなPMはウエットデニューダーを通過し, 後段のミストチャンバーで捕集される. 捕集液は水溶性ガス, PMともに純水を用い, それぞれ0.25 mL min⁻¹ plate⁻¹と0.45 mL min⁻¹で各捕集器に送液した. 水溶性ガス, PMを捕集した溶液は本観測用に改良したフラクションコレクター内のサンプルボトルに保存した. それぞれのサンプル溶液は研究室に持ち帰り, 重量測定後, メンブランフィルター(孔径0.45 µm)でろ過し, イオンクロマトグラフでCl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻及びSO₄²⁻濃度を測定した. さらに, 富士山頂における観測と同期間に, 富士山南東麓に位置する御殿場口太郎坊(1,284 m)において, 大気中酸性ガス(HCl, HNO₂, HNO₃, SO₂)及びPMに含まれる陰イオン(Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)の連続観測を行った. 太郎坊における観測では, ウエットデニューダーとパーティクルコレクターをそれぞれのイオンクロマトグラフと組み合わせて構築した自動分析システムを使用し, 時間分解能を30分として測定した.

3. 結果と考察

2018年7月19日から23日までの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(NOAA, HYSPLIT

Model⁵⁾)した. いずれの時間帯においても気塊の流入方向に大きな変化は見られず, 朝鮮半島を経由して山頂に流入していた.

富士山頂で観測された水溶性酸性ガスとPMに含まれる陰イオンにおいて, HONO, NO₂⁻, SO₄²⁻はLOQを下回ったデータが多く, それぞれ95.8%, 71.9%, 19.8%のサンプルはLOQ以下であった. 定量可能なサンプル数を増やすには, 大気サンプル吸引流量の増加あるいは時間分解能を下げることがある. また, ガス態と粒子態での存在割合の中央値は, HCl/Cl⁻: 0.79, HNO₃/NO₃⁻: 1.36, SO₂/SO₄²⁻: 1.83であった. 各成分の平均濃度を比べると, 水溶性酸性ガスはHNO₃ > HCl > SO₂ > HONOの順に, PMではCl⁻ > NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NO₂⁻の順に高くなり, ガス態と粒子態でその順序に違いが見られた.

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) 日本化学会編: “季刊化学総説(1990). No.10, 大気の化学” 学会出版センター p.125.
- 3) Boring, C. B., Al-Horr, R., Genfa, Z., Dasgupta, P. K., Martin, M. W., Smith, W. F. (2002). Field measurement of acid gases and soluble anions in atmospheric particulate matter using a parallel plate wet denuder and an alternating filter-based automated analysis system. *Anal. Chem.*, **74**, 1256-1268.
- 4) Al-Horr, R., Samanta, G., Dasgupta, P. K. (2003). A continuous analyzer for soluble anionic constituents and ammonium in atmospheric particulate matter. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 5711-5720.
- 5) Air Resources Laboratory: HYSPLIT Model, available from <<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>>, (accessed 2018-10-24).

謝辞

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ました. また, 本研究の一部はJSPS科研費(課題番号17K00521, 17KK0011)の補助により行われました.

自由対流圏における水晶振動子システムを応用した水銀挙動測定システムの課題

野田和俊¹, 兼保直樹¹, 丸本幸治²

1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 2. 国立水俣病総合研究センター

1. はじめに

水銀に関する水俣条約を批准し、日本が率先して水銀の使用(利用)の削減と水銀を使用しないシステムの構築など、全般的な対応の取り組みを進める必要な状況である。これから、主に大陸からの影響の測定を目的として、近傍のローカル発生源の影響を受けにくい2000m以上の自由対流圏高度での水銀汚染状況の通年観測を2016年から開始し継続中である。このシステムは、冬場など商用電力が供給されていない状況でも電池程度で動作可能な水晶振動子をセンサとして用いたシステムである。継続中の測定について、その結果と今後の課題¹⁾など、簡潔に報告する。

2. 測定システム

現在、環境中における水銀挙動について、越境輸送の観測に不可欠な自由対流圏内での通年測定は国内では行われていない。その理由として、測定システムをそのような環境で安定して動作させるための商用電力が供給されている場所がないことが大きな理由の一つである。これから、商用電力に頼らない、バッテリー等で稼働するシステムとして、水晶振動子を検知センサ(QCM)とした測定機器を2016年に初めて旧富士山測候所に設置して通年観測を開始した¹⁾。基本的な検知原理について説明する。大気中の水銀は、自由対流圏高度ではガス状元素態水銀と考えられている。このQCMセンサの電極はもともと金が蒸着されており、この水晶振動子の金電極と大気中の金属水銀(以下、単に水銀)とのアマルガム反応によって電極表面の質量変化が生じ、それに伴う発振周波数変化に変換する測定システムを試作¹⁾し、この測候所内に設置して観測を開始した(図1)。

測定構成は、旧測候所南西方向の外側から大気をセンサユニットに接続したポンプによって吸引導入(テフロンチューブ・約20m)する構成(図1)である。施設の制約上、7~8月の約2ヶ月間しか人の出入りと商用電力の利用ができないため、センサユニットはリチウム電池(CA123A型)のみでも動作する構成とした。耐寒用鉛バッテリーは、小型太陽パネルを接続して受電しており、ポンプ、タイマー等はここから給電されて動作する構成としている。なお、前年度の測定結果を元に今年度は、リチウム電池のみで動作するシステム(1組)と、耐寒用鉛バッテリーで動作するシステム(1組)の異なる構成で試験を行った(図2)。また、センサユニットは前年度問題なく動作したことから、前年度測定用の水晶振動子1個(1ch)から、2個の2chタイプのロガーに変更し、測定点数を増やして観測データの充実をはかる構成とした。

3. 測定結果と課題

測定結果の一例を図3に示す。前年度同一2組のシステムは問題なくほぼ通年動作した実績を踏まえて、今回2chタイプのシステムとし、さらにリチウム電池も容量(本数)を増やした構成で観測に望んだ。その結果、リチウム電池だけで動作するセンサユニットは、記録されるべきメモリカード(マイクロSDタイプ)の不良により、データ回収ができなかった。これから、動作の有無の判定もできなかった。もう一組の鉛バッテリーのユニットは動作開始後、約3ヶ月で停止していた。なお、記録されたデータ自体は問題ないことを確認した。これから、今回使用した鉛バッテリーは新品ではないため、環境による電力低下が考えられる。さらに、太陽電池パネルも室内の窓枠に取り付けているため、必ずしも発電能力は十分とは言えない状況と考える。得られた3ヶ月分のデータについては、前年度の動きと類似の結果が示されていた。



(a) 測定システムの基本構成



(b) 使用した2chタイプの測定用ロガー

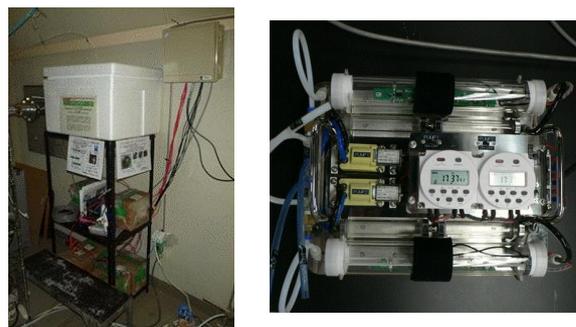
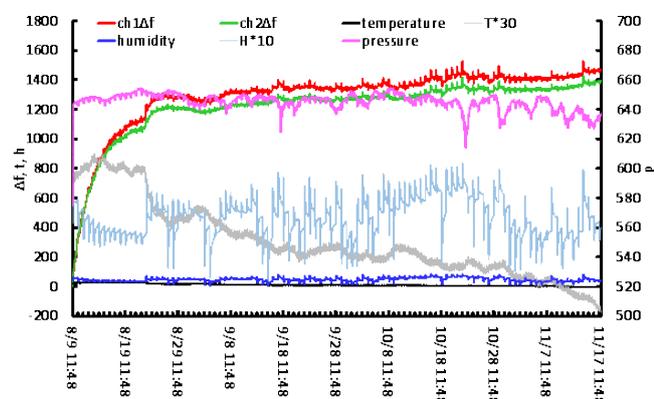


図2 施設内設置状況の一例

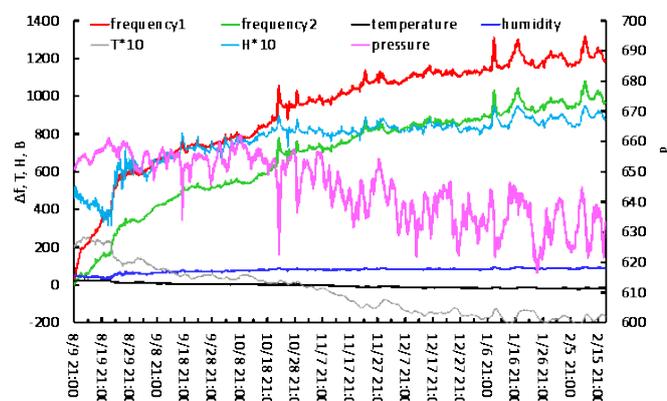
図1 水晶振動子を活用した水銀測定システムの基本構成

この他、同じセンサユニットを室内に設置して、自然通気状態での室内モニタとして使用している。こちらのセンサユニットも、約6ヶ月動作して停止していた。これらの結果より、前年度の動作条件を元に電力量(電池容量)を用意したものの、想定よりもかなり早く停止してしまった原因については、1)消費電力量の見誤り、2)購入した新品電池の耐環境特性(温度等)など前年度購入した電池と比較して劣化が早かったなどが考えられる。今回は、原因を特定できるだけの情報がないため、今後はさらに容量を増やした対策を施す必要があると考える。

2018年初夏に設置したセンサユニットは、同じ2chタイプであるが、ある特定期間だけ測定・記録するシステムとして設置した。つまり、一定間隔で通年測定・記録するのではなく、1月と4月のみ測定を行う構成としている。それ以外の期間はポンプも動作しないことから、その期間だけの測定データが得られる構成として行った。残念ながら、現在の動作確認はできないが、そのデータに期待したいところである。



(a) 2017.8~2017.11 までの測定結果の一例(外気)



(b) 2017.8~2018.2 までの測定結果の一例(室内)

図3 2017~18年富士山測候所観測結果の一例

4. まとめ

旧富士山測候所において通年観測可能な金電極素子 QCM によるセンサユニットを活用した水銀測定システムを2016年から使用している。初年度の結果を元に、2年目は一部システムの変更を行い、データの充実をはかる予定であったが、動作不備などから得られたデータが少ない状況となった。主な原因は電力容量に関する内容であったことから、これらの対策を施す必要があると考える。その他、2年間の使用でその他の課題なども分かってきた。これらの対策を抜本的に行わないと、今後有効なデータを得ることは難しいことも考えられる。

本文に記載した、すべての写真・図・グラフは著者が権利を有するものである。

謝辞

本研究は、2017年度年賀寄附金配分事業の助成を受け実施しております。また、本研究で使用しております旧富士山測候所は、現在NPO法人富士山測候所を活用する会が運営管理しております。ここで、改めて感謝いたします。

参考文献

- (1) 野田、兼保:「自由対流圏における水銀挙動測定システム(II)」、平成30年度電気学会全国大会、1404-A3-3-184 (2018)

富士山での小型小電力ガスセンサーによる大気観測

千島峻¹, 高橋智樹¹, 加藤俊吾¹, 三浦和彦², 大河内博³, 鴨川仁⁴
 1. 首都大学東京, 2. 東京理科大学, 3. 早稲田大学, 4. 東京学芸大学

1. 緒言

富士山頂は高度 3776 m に位置し, 中国, 韓国などの大陸からの長距離越境汚染を捉えるのに適している。我々のグループは, 2008 年より富士山頂にて, オゾン(O₃)と一酸化炭素(CO)を観測している。

観測に用いる従来の測定機(CI)は, 大型かつ消費電力が大きいために, 富士山頂での観測は「電源の確保」, 「安全上の問題」の観点から富士山の山開きから閉山までの約 2 ヶ月間でしか行うことができない。これを解決する新たな手法として, 小型で小電力な電気化学センサー(ECS)を用いる。この ECS はコンパクトであり, 消費電力も少なく, 低コストである等, 大型測定機にはない特徴を有する。また, 電池駆動が可能のためポータブルとしても使用ができる。本研究では富士山頂の夏の期間において ECS 用いた大気観測を行い, CI との比較を行うことで, 新たな観測方法の検討を行った。更に, 電池駆動が可能なる点を活かしたポータブルでの測定方法を示した。

2. 実験

2-1. センサーによる富士山頂での大気観測

2018 年 7 月 14 日から 8 月 22 日まで, 富士山頂の剣ヶ峰に位置する富士山測候所 1 号庁舎 2 階において, CO 及び O₃ の大気観測を行った。センサーは Alphasense 社の CO ECS, O₃ ECS を用いた。続いて, センサーの測定結果はそれぞれ自動連続測定が可能な O₃ 計(紫外吸収法 Thermo Environment model 49i (O₃ CI)と CO 計(赤外吸収法 Thermo Environment model 48C) (CO CI) の測定値を参照値として比較した。

2-2. 富士山下山時における CO の測定

ECS とデータロガー, ポンプを組み合わせることで完全電池駆動のポータブルセンサーを作製し, 2018 年 7 月 19 日, 富士山下山時にリュックに取り付けて富士山下山時に測定を行った。

3. 結果と考察

3-1. センサーによる富士山頂での大気観測

測定結果を図 1 に示す。O₃ ECS の値は O₃ 計の測定値と同様の変動を示し, 相関プロットでは高い直線性を示した。一方で, CO ECS の値は大きく変動してしまう期間が見られ, 相関プロットは良好な直線性が得られなかった。この結果は,

山頂の CO 濃度が非常に低濃度であるため, 他の要素由来のシグナルや環境変化によってセンサーのターゲットシグナルが埋もれてしまったと考えられる。

3-2. 富士山下山時における CO の測定

測定結果を図 2 に示す。CO ECS の結果から, 下山するにつれて CO 濃度が高くなり, CO スパイクが観測された。このスパイクが観測されたときの高度を調べてみると 3300 m 付近と 3100 m 付近にあり, この地点には山小屋があるため, そこで使用されているディーゼル発電機から排出された CO を捉えたと考えられる。

4. 結言

ECS による富士山頂での大気観測は, 特に O₃ ECS は CI と同様に測定することができた。ECS は小電力であり, 電池駆動が可能であるため, バッテリーを積むことで夏の期間以外にも使用することができ, 通年観測が可能であることがいえる。今後はセンサーの測定値の精度を上げることで, より信頼できるデータを得られるようにしていく予定である。

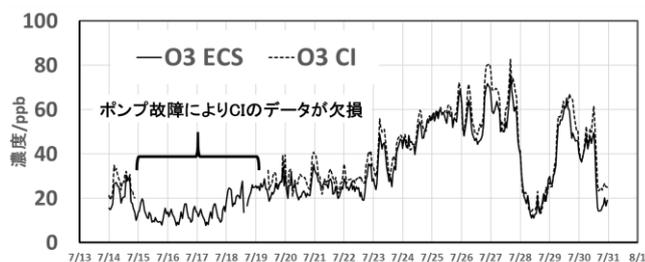


図 1 2018 年における O₃ の観測結果の比較

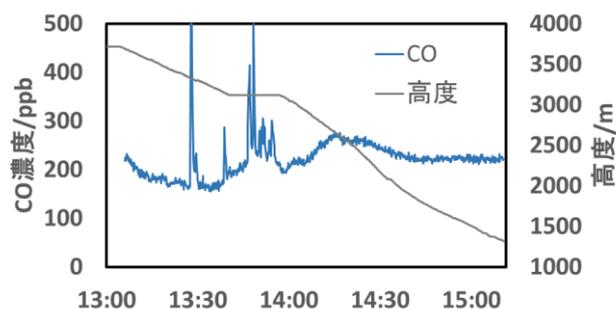


図 2 富士山下山時における CO の測定結果

富士山山頂における空中花粉粒子が示す新たな花粉輸送モデル

三木健司¹, 磯部洋明², 中村公人¹, 長島瑠子³, 伊藤梓¹, 関大吉³, 増田凱斗¹

1.京都大学農学研究科, 2.京都市立芸術大学美術学部, 3.京都大学総合生存学館

1. はじめに

生物粒子の存在範囲を知るため、地球規模の大規模飛散は1970年代から微生物を主とした生物粒子の高高度飛散の可能性の研究が始まった¹⁾。現在も宇宙科学者や微生物学者により、高高度を飛散する生物粒子の調査が行われている²⁾。しかし、生物粒子の大規模飛散はどのような条件で起こりうるのか、どのような生物粒子が大規模飛散しやすいのかはいまだ解明されていない。そこで本実験において、富士山山頂において、最大粒径をもつ生物粒子である花粉を目視で観察可能な形式でサンプルすることで、富士山山頂において観測される生物粒子の特徴を捉えることを目的とした。

2. 実験方法

富士山麓(観測点1)と富士山頂(観測点2)において花粉観測を行った。観測点1では、Cascade Impactor (E 6 sampler, Tisch Environmental, Ohio)に吸引ポンプ(SIP-32L型, 柴田科学, 埼玉)を接続し(図1)、2017年9月6日午前11時から9月7日午前7時にかけて外気を吸入することにより、サンプリングプレート上に花粉粒子を捕集した。同時に、観測点2(東経138°94', 北緯35°29')において重力法(RK-ISA型, 西精機株式会社, 千葉)により花粉サンプリングを行った。実験により取得したサンプルはGVグリセリンゼリーにより着色、封入を行い、顕微鏡(E200, ニコン, 東京)による目視観察を行うことにより花粉粒子の有無、花粉の形状や種類の識別を行った。

3. 結果と考察

本実験期間は花粉の飛散時期ではなかったが、観測点1において観測されたサンプル内にて2粒のイネ科花粉観測された。このことから、低海拔高度におけるイネ科花粉の飛散が確認できた。観測点2におけるサンプル内にGVにより染色された粒子が観測された。観測された粒子はGVにより染色されていることから生物起源であることが特定され、形態学的特徴から花粉粒子であることがわかるが、観測された粒子は全て粒子の破片であり、完全な形をとどめた花粉粒子の確認は出来なかった。

以上の結果を踏まえ、花粉の高高度への輸送過程について以下の仮説を立てることができる。

1. 地表付近が温められ、上昇気流が発生する。
2. 湿潤な空気が上昇することにより空気が飽和状態となる。
3. 空気が飽和することにより花粉粒子が水分を含み、破断する。

る。

4. 粒子が小さくなることにより、花粉破片の風媒運搬が促進される。
5. 花粉粒子破片の高高度飛散が引き起こされる。

花粉粒子は湿度が上がると破断が引き起こされることは先行研究により明らかとなっている³⁾。花粉粒子は破断が起きている場合、観測対象とはならないことが一般的であるため、上記の仮説が証明できると、新たな花粉の長距離、高高度飛散仮説が低減できる可能性が生まれた。

今後の課題として、本研究の追加実験並びに花粉粒子破断による花粉飛散運動の支配方程式への影響を解析すると同時に、富士山頂における追観測も行いたい。

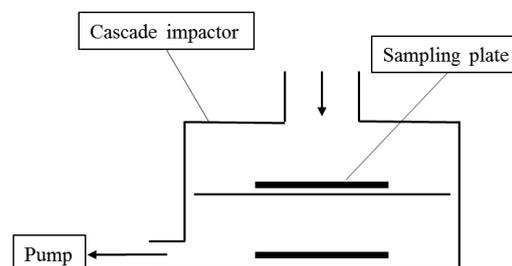


図1 花粉捕集装置の概略図

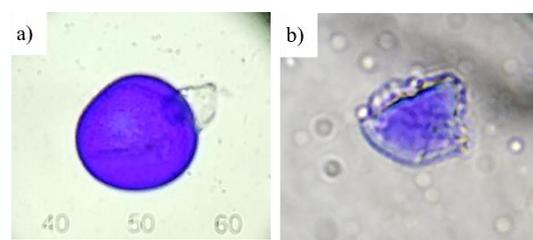


図2 観測された花粉粒子 a)観測点1において観測されたイネ科花粉 b)観測点2において観測された花粉粒子破片

4. 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援助をいただきました。また、本実験はJSPS科研費18J12315の助成を受けた研究です。

参考文献

- 1) Wainwright, M. Alharbi, S., Wickramasinghe, N.C. (2006). How do microorganisms reach the stratosphere?, *International Journal of Astrobiology*, **5**, pp. 13–15.
- 2) Smith, D.J., Griffin, D.W., Schuerger, A.C. (2010). Stratosphere microbiology at 20 km over the Pacific Ocean, *Aerobiology*, **26**, pp. 35–46.
- 3) Hong, T.D., Ellis, R.H., Buitink, J., Walters, C., Hoekstra F.A., Crane, J. (1999). A model of the effect of temperature and moisture on pollen longevity in air-dry storage environments, *Annals of Botany*, **83**, pp. 167–173.

山頂で検出された中性子上昇が雷起源かどうか？

Summary of a high-energy radiation event from summer 2016 observations on Mt. Fuji, Japan by the ground-based instrument GODOT

Jeffrey Michael Chaffin¹, David Miles Smith¹, John Ortberg¹, Monica Leys¹, Gregory S Bowers², Tomoyuki Suzuki³, Masashi Kamogawa³

1. University of California Santa Cruz, Santa Cruz, CA, United States
2. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, United States
3. Tokyo Gakugei University, Tokyo, Japan

We report on a possible photo-neutron detection, probably the result of a cosmic ray extensive air shower (EAS), observed from the summit of Mt. Fuji, Japan by GODOT. Analysis of the event suggests the detection of a neutron shower, probably resulting from photonuclear reactions of downward bremsstrahlung photons and atmospheric nuclei. We initially mistook the detection as a neutron shower resulting from a Terrestrial Gamma Ray Flash (TGF), but the absence of a sub-millisecond high count rate of photons typical of in-beam TGF detection, and meteorological data showing no lightning activity in the area at the time, confirm that what was observed was not TGF related. While similar delayed neutron components of EASs have been reported in the past¹, we believe that our tentative interpretation of the neutrons as having a photonuclear origin, rather than originating in nuclear spallation processes, may be new and important.

1. Observation

On the 20th of July 2016 at 19:26 UT the Gamma-ray Observations During Overhead Thunderstorms (GODOT) instrument located on the summit of Mt. Fuji (3776 m) observed an increase in count rate of 56 counts above background over several milliseconds (Figure 1).

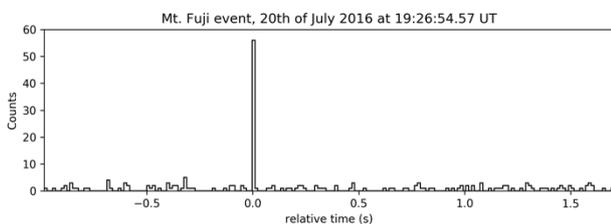


Figure 1: Time profile of the Mt. Fuji event indicating an increased count rate above background. The time is relative to the event start time of 19:26:54.57 UT.

2. Analysis

We compare our observation with a detector response simulation of photo-neutrons. The simulation was initially created to model a photo-neutron detection, the result of a large TGF in Uchinada Japan, observed by GODOT²) in the winter of 2015. Using Geant4 a downward TGF was simulated at 1.5 km, based on the likely altitude for the main

negative charge center in Japanese winter thunderstorms over the sea of Japan. An RREA gamma ray spectrum was input with all photo-neutrons produced through photonuclear reactions (γ, n), tracked down to the ground and into the instrument.

The primary neutron energy signature in the detector consists of neutrons captured by hydrogen nuclei (protons), mainly in the plastic scintillator itself, immediately releasing a gamma-ray at 2.223 MeV and forming deuterium. The gamma ray Compton scatters once in the scintillator before exiting (this being by far the most likely interaction). The 2 MeV Compton shoulder represents the energy deposited by a scatter of 180°, which has a high probability of occurrence and deposits the most energy of any scattering angle.

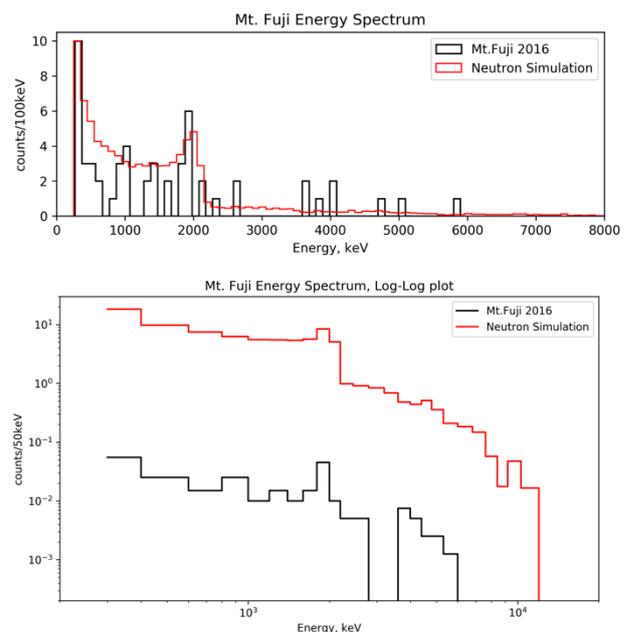


Figure 2: The linear(top) and log-log(bottom) plot of the energy spectrum of the Mt. Fuji event and neutron simulation of the GODOT instrument.

You can see in Figure 2 a peaked shoulder at 2MeV in both the Fuji event and the neutron simulation. This Compton

shoulder of a 2.223 MeV photon is characteristic of neutron capture in a plastic scintillator. Qualitatively the similarities in the spectral structures are evident but in order to determine a quantitative comparison we applied two statistical tests, the two-sample Anderson-Darling and Kolmogorov-Smirnov tests, the null hypothesis being that the Mt. Fuji event and the simulations are sampled from the same spectrum. We created 20,000 bootstrap samples from the neutron simulation data, each of which contained the same number of counts as the Fuji event data. The fraction of null-hypothesis cases (purple) that are in better agreement than the Fuji event (red line) is the confidence with which we might reject the hypothesis that the Fuji spectrum is equivalent to a subset of the neutron simulation (Figure 3).

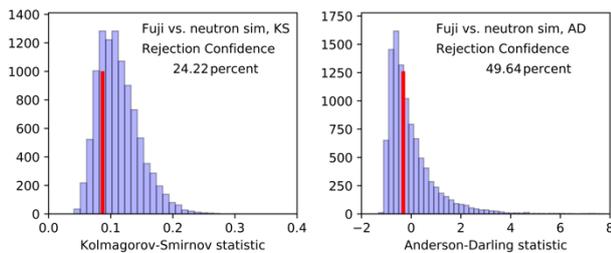


Figure 3: Left, Kolmogorov-Smirnov statistic for 20,000 boot-strap samples of the neutron simulation data (purple) and for the Fuji data (red). Right, Anderson-Darling statistics for 20,000 boot-strap samples of the neutron simulation data (purple) and for the Fuji data (red).

In fact, the Fuji event fits the model as well as a large fraction of the subsamples from the model itself, showing

that the neutron interpretation is completely consistent with the data. In contrast, a spectral model based on direct interaction in the detector of the gamma-ray spectrum of a TGF was strongly rejected.

3. Conclusion

Because EASs that reach the ground are vastly more common at high altitudes, the study of TGFs and other high-energy thunderstorm phenomena from a mountain station requires extra vigilance in order to make sure the two phenomena are not confused. While the “prompt” signal of gamma-rays and electrons is much shorter for an EAS than a TGF, the several-millisecond time profile of the neutron signal, delayed by the thermalization of the neutrons and their diffusion to the ground, is similar for both kinds of phenomenon.

By using simulations developed for TGFs, we can contribute usefully to the understanding of EAS physics by showing that photonuclear reactions, and not only nuclear spallation reactions, can contribute to (and perhaps dominate) the neutron component of EASs.

References

- 1) Yu. V. Stenkin, D. D. Djappuev, and J. F. Valdes-Galicia (2007). Neutrons in Extensive Air Showers. *Physics of Atomic Nuclei*, 70, 1088-1099.
- 2) G. S. Bowers, D. M. Smith, G. F. Martinez-McKinney, M. Kamogawa, S. A. Cummer, J. R. Dwyer, D. Wang, M. Stock, Z. Kawasaki. (2018). Gamma-ray signatures of neutrons from a terrestrial gamma-ray flash. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 10,063–10,070. <https://doi.org/10.1002/2017GL075071>

2018年夏季高高度放電発光現象の観測報告と過去の観測における報告例の解析

伊藤有羽¹, 鈴木智幸², 鴨川仁², 楠研一³

1. ブリティッシュコロンビア大学, 2. 東京学芸大学, 3. 気象研究所

1. はじめに

活発な雷放電を伴う雷雲によって雷雲上空, または雷雲上部から直接発生する高高度放電発光現象(レッドスプライト, ブルージェット, エルプス等)を広範囲で観測するために, 2013年夏季から毎年富士山山頂に高感度 CCD カメラを設置している. この間, 2013年にはレッドスプライトが, 2014年にはレッドスプライトに加えて, 世界的にも観測事例が少ない雷雲上部から電離層にまで達する雷放電である巨大ジェット, ブルースターター, エルプス, 雷雲上部から上方に伸びる雷放電など多数の高高度放電発光現象の観測に成功している. 巨大ジェットは東北地方で発生したことが分かっていることから, 富士山からの観測の有効性は保証されている. 2018年夏季にも観測事例を増やすために, CCD カメラを2台設置して, 北から東が視野に収まるように設定し, 2013年から実施している観測と同様に観測を行った. 2018年夏季は, 機器の不調に加えて, 視野方向及び富士山山頂が雲に覆われることが多かったため, 高高度放電発光現象をとらえることができなかった. このため, 2013年夏季に観測された, 高度 50 km~100 km の高高度で発生する赤色瞬間発光であるレッドスプライトを発生させた雷雲の解析を行った結果を報告する.

2. 観測方法及び解析

富士山山頂に設置した高感度 CCD カメラの画像は, 16.7ms の時間間隔で GPS をもとにした 1ms 毎の詳細時刻が画面に挿入されたのち PC に入力され, 動体監視ソフトにより, 画面内の輝度変化が閾値を超えた場合に前後 5 秒間が記録されるようになっている. 富士山から見たスプライトの発生方位角及び光学的な特性は画像を解析することにより行った. 雷雲の時空間解析には気象庁のレーダーエコー合成図及びエコー頂高度データを使用した. 2013年7月22日に観測されたレッドスプライトは, 層状性降水域上空で5例, 対流性降水域付近で1例が発生していたことが分かっている. 図1は, 富士山から撮影された層状性降水域上空で発生したレッドスプライトの1例である. 今回は, 2013年7月22日に, 富士山山頂に設置された高感度 CCD カメラ(16.7ms の時間間隔で GPS 時刻をもとにした詳細な時刻を画面に挿入)で撮影されたスプライトを発生させた雷雲と関連する降水の分布・時系列変化及び鉛直構造について解析を行った. 解析には, 気象庁レーダーエコー合成図及びエコー頂高度データを使用し, 対流性降水と層状性降水の変化を解析するため, Houze(1977)を参考に対流性降水域(強い降水域)を 8mm/h 以上, 層状性降水域(弱い降水域)を 1-8mm/h の領域と定義



図1 2013年夏季に富士山から観測されたレッドスプライトの一例(2013/07/22 10:46:03UTC).

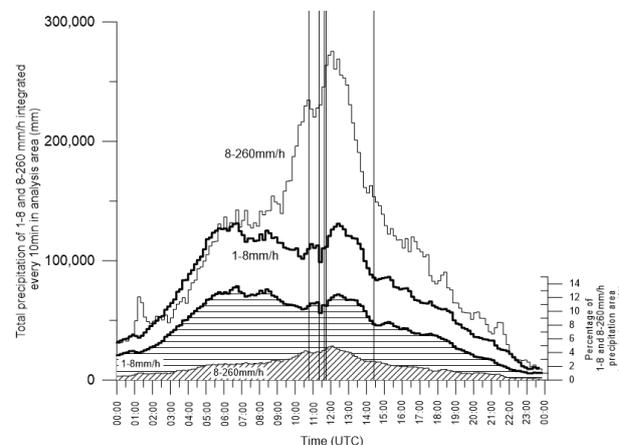


図2 解析領域内における層状性降水域(太線)と対流性降水域の10分毎の総降水量(左軸), 解析領域内に占める層状性降水域(太線)と対流性降水域の割合(右軸). 縦線は, スプライトの発生時刻を示す.

りして, 解析範囲(北緯 34-40 度, 東経 137-144 度)内に占める各降水域の割合, 10 分毎の総降水量の時系列変化とスプライト発生時刻との関係について解析を行った.

3. 解析結果

図2は, 解析領域内における層状性降水域と対流性降水域の10分毎の総降水量, 解析領域内に占める層状性降水域と対流性降水域の割合を示す. 層状性降水域上空で発生した5例のスプライトは, 解析領域全体に占める層状性降水域の割合の極小付近, かつ対流性降水域の割合の極大付近で

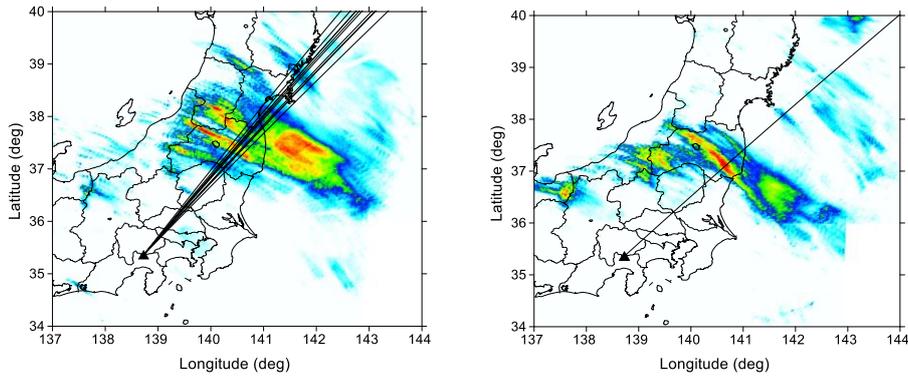


図3 2013/07/22 10-12UTC間(左図)及び14-16UTC間(右図)の積算降水量. 実線は、富士山山頂(▲)からのスプライト発生方位角を示す.

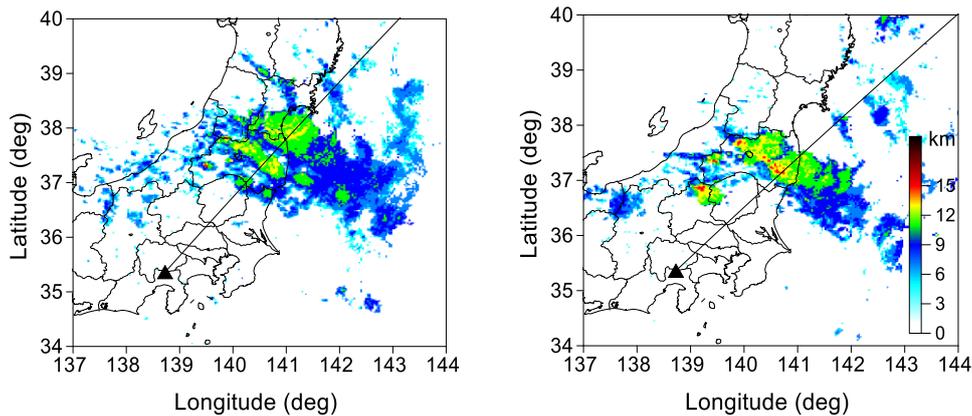


図4 2013/07/22 10:50UTC(左図)及び14:30UTC(右図)のエコー頂高度の分布. 実線は、富士山山頂(▲)からのスプライト発生方位角を示す.

発生していた. スプライト発生時の対流性降水域での総降水量は、急激に増加しており、降水強度が強く多量の降水が地上付近まで達していたことが示唆された. 一方、対流性降水域付近上空で発生した1例のスプライト発生時にも、層状性降水域の割合の極小が見られたものの、対流性降水域での総降水量の急激な増加は見られなかった. ここで、降水量分布を際立たせるために、毎正時前2時間の積算降水量分布を求めた. 図3は、スプライト発生時を含む2時間積算降水量の分布を、図4は、スプライト発生時のエコー頂高度の分布を示す. 短時間で5例のスプライトを発生させた場合(図3左図)では、スプライト発生位置の西側には独立した複数の線状の強い降水分布が見られ、その東側には太い帯状の降水域内に複数の線状の強い降水域が包含されたような分布となっていた. スプライト発生位置では、相対的に降水量が少なくなっていた. スプライト発生位置付近のエコー頂高度は平たんで比較的高い(図4)ことから、この領域では一様な強い上昇流の存在が示唆された. その東側の帯状降水域のエコー頂は低く、上昇流は相対的に弱いものと推測された. 一方、1例のスプライトを発生させた場合(図3右図)のスプライトの発生位置は、線状の強い降水分布の東端付近に位置していた. この周辺では、エコー頂高度が周囲よりも局所的に

高い対流性エコーが分布していた(図4右図). その東側には太い帯状の降水分布が見られるものの、そこでの相対的な降水強度は弱かった.

4. まとめ

5例のスプライトを発生させた雷雲は、非常に多量の降水をもたらしていた. スプライト発生位置周辺では、地上降水が弱いにもかかわらずエコー頂が広範囲で高かったことから、多量の降水粒子を上空で維持するための強い上昇流の存在が示唆された. 一方で、1例のスプライトを発生させた雷雲付近では、狭い領域に対流性エコー頂分布が見られたことから、強い上昇流は対流雲付近に限定されていたものと考えられる. また、積算降水量も5例のスプライトを発生させた雷雲と比較して少なかった. 今後は、エコーの鉛直構造の違いについて、解析を行う予定である.

参考文献

- 1) Houze Jr., R.A. (1977). Structure and dynamics of a tropical squall-line system, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1540-1567.

通信機能付き簡易モニタリング機器「HALKA」の実証実験

遠藤周¹, 鴨川仁²

1. 東京大学, 2. 東京学芸大学

1. はじめに

富士山測候所で越冬観測を行う際には、現状、通信機器の無いロガーでデータを取ることも多い状況である。そのため、様々なセンサと接続できる通信機能付きの簡便なロガーがあれば、リアルタイムでデータが確認でき、研究の幅が広がるであろう。そこで、昨年度より、当研究室が協力して開発している簡易モニタリング機器「HALKA」を使用し、越冬観測に使用することが可能か試験を行っている。

昨年度は、電池のみで駆動しているものと、太陽電池と電池を併用しているものの計2台の HALKA を富士山測候所 1号庁舎2階に設置した。結果として、電池のみは11月に機能を停止してしまった。太陽電池付きは1月に一度機能停止してしまっただけで、太陽光による再充電が行われたが、HALKA内の時計が狂いデータが取れなくなってしまった。

それを受けて、今年度は①通信間隔を減らし、電力を温存させる。②ファームウェアを改善し、一度電圧が低下しても、再充電ができれば再起動可能にする。の2点を改善し、再度越冬観測を試みた。

また、夏季においては、HALKA と屋外に設置した気象測器とにより、気象要素のリアルタイムデータを取得することができ、富士山測候所における他の研究にも役立てていただけた。

2. 機器の概要

「HALKA」は、各種観測に使用できる、リアルタイム通信が可能なロガーである。単三充電電池 3本および太陽電池で稼働し、データの保管とリアルタイム通信を行う(電池のみで1年間の稼働を目指している)。データはクラウドに送信され、いつでも確認することができる。通信の間隔は1時間ごとから24時間ごとまで(遠隔地から)自由に設定できる。センサ接続用の規格、SDI-12に対応しているので、農業関係のセンサだけでなく様々なセンサに使うことができる。今年、新しい太陽電池内蔵型1台と、昨年と同じ太陽電池外付け型1台の2台で観測を行なった。後者は再充電時の再起動が可能なファームウェアをインストールした。

3. 方法

太陽電池内蔵型 HALKA は7月13日から8月22日に屋外に設置した。充電池に加え 0.3W(7cm×4cm)の太陽電池が内蔵されており、METER社のウェザーステーション ATMOS41 からデータを所得し観測を行った。下記の Web サイト上で、気温、湿度、気圧、降水量を確認できる。

<http://fewls.x-ability.jp/static/chart.html?sensor=ATM41&imei=860585004016548>

また、ここから数値データをダウンロードできる。

<http://npo.fuji3776.net/cug/data.html>

device timestamp が観測時間を示す。また、各 value は以下の観測値を示す。

value1 日射(W/m²)

value2 降水量(mm/h)

value3 落雷数(回)

value4 風速(m/s)

value5 風向(度) (設置時の方位合わせ不備のため、0°方位は不明。)

value6 瞬間最大風速(m/s)

value7 気温(°C)

value8 蒸気圧(kPa)

value9 気圧(kPa)

太陽電池外付け型の HALKA は7月13日に設置し、越冬を試みた。太陽電池と外部取り付けされた充電池で駆動させ、METER社のVP-4センサを取り付けた。1号庁舎2階の中の、気温、湿度、気圧を計測した。

<http://fewls.x-ability.jp/static/chart.html?sensor=VP-4&imei=860585003206389>

4. 結果

越冬観測を試みた太陽電池外付け型の HALKA は、11月16日を最後に通信が途切れてしまった。その直前でも電圧が低下しているわけではないため、センサと本体の接続部が外れてしまい通信が止まってしまったと考えられる。昨年度に届かない結果となってしまい非常に残念であった。

Battery of HALKA(CSV)

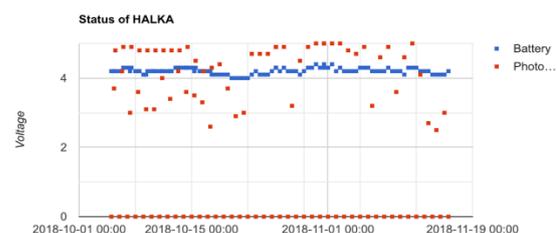


図1 越冬観測を試みた HALKA の電圧の推移
青い点が充電池の電圧、赤い点が太陽電池の電圧。

富士山の永久凍土研究：経過観察

池田 敦¹

1. 筑波大学生命環境系

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。2018年は、引き続きその観測データや山頂一帯の浅層地温観測データを回収・分析するとともに、浅層地温観測関連の測器を一部撤去した。実際のデータ回収にあたっては問題が多く発生し、その復旧は2019年に持ち越しとなっている。

2. 2018年の状況

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。観測孔内のセンサー類は、本来こうした故障時に引き上げ可能な仕様であったが、孔内が凍結しており回収できなかった。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のが、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を加熱したが、浸水量は深刻であり加熱方法を見直す必要があった。また、9月以降10月上旬まで、天気がぐずつく状態が多く、その他の周辺観測孔の維持管理も十分にできず、次年度まで電池がもたず欠測となる観測点が複数、生じる見込みである。

3. 解析データ

上記のように、2018年はデータ回収に支障が多かったため、以後の解析は2017年の秋(融解期の終了時)までのデータを用いて行った。2011年10月11日から2017年10月10日までのHサイトの観測孔内21深度および地表面の毎時の地温を主な検討対象とした。それと対比させるため、深さ3.0mの地温観測孔(Kサイト、標高3695m)17深度および地表面の毎時の地温、Kサイトおよび山頂(3775m)の毎時の気温、H・K両サイトの地表に置いた転倒ます型雨量計

で計測した雨量を参照した。年平均値等は各年10月11日からの1年間について算出した。欠測期間の値については周囲のデータとの間で立てた一次式を用いて補完した。

4. 結果・考察

H・K両サイトにおいて、年平均地表面温度は年平均気温より2℃高かったほか、両地点の地表面温度は非常によく似た変動を示した。ところが、Hサイトでは深さ約1mより下方に永久凍土が存在するが、Kサイトでは降雨に伴い地温が大きく上昇して、10月には全層が融解した。Hサイトでも降雨浸透に伴って薄い季節的融解層(活動層)の昇温が観測されたが、Kサイトに比べ変動幅ははるかに小さかった。原位置で簡易透水試験を実施したところ、HサイトはKサイトより地表の透水性が悪かった。くわえて山頂にあるHサイトではその風下にあるKサイトよりも雨水が強風で吹き流されるため、地表に到達する雨量も2/3ほどであった。そのため、降雨によって地中にもたらされる熱量が両地点で異なり、永久凍土の有無が分かれていると考えられた。

上述のH・Kサイトの地温の違いを、地盤に浸透する水量の差異に求める考えは、最近明らかにしたことではなく、すでに何度も指摘したことである。ただ、この2年間に気付いたことがあり、それは富士山の年平均地温の断面形が、これまで報告されている世界の永久凍土帯の地温断面とは非常に異なっていたことである。

活動層中の熱伝導率は、凍結期と融解期で異なることが多く、その非対称性を示す指標としてサーマルオフセット(永久凍土上端の年平均地温から年平均地表面温度を引いた値)が提案されている。低地の永久凍土帯では、一般に融解時に土層の熱伝導率が低下するためオフセットが負値になるが、富士山では大きな正のオフセットがあった。また、オフセットの大きさは地表の積算寒度に比例し、積算暖度はオフセットを打ち消す方向に寄与した。永久凍土のないKサイトについても、同様の指標として2.1m深と地表の温度差を算出したところ、同じく正のオフセットが生じていた。先に述べた融解期のみが生じる降雨浸透による移流的な熱輸送が、富士山では、地盤に夏季に熱が伝わりやすく冬季に熱が伝わりにくい状態を生み、特異なオフセットを生んでいると考えられた。

ネパール高所非電化農村地帯向け風力主体ハイブリッド発電機の実証実験

三沢一浩¹, 桐原悦雄¹, 村越英樹¹, 鴨川仁²

1. 産業技術大学院大学 2. 東京学芸大学

1. はじめに

ネパールの国土は約40%が無電化であり、特に過疎の村では送電線もなく電気のない生活を余儀なくされている。

高所山岳地域では3000mを越える高所であることから、送電線を必要としない小型再生エネルギー発電が求められている。高所では天候によって風向きが変化すること、そして高所山岳地域特有の風が吹くことから、どの方向からでも風を受けて回転できる風力発電が必要とされている。

この課題解決を目的に、図1に示す高所向け持ち運び可能な風力主体でサブとして太陽光を持つ発電システムを試作し、ネパールの高所に近い環境である富士山測候所に於いて発電機の運搬、設置、運転試験を行った。



図1. 持ち運びできる風力発電と太陽光発電概要

2. 風力発電の設置と特徴

試作した風力発電システムは、高所山岳地域での使用を考慮して、どの方向からでも風を受けて回転できるように図2に示す垂直軸型パドル式の羽根とし360°どの方向から風を受けても回転するものとした。なお、風力発電の主流は水平軸型のプロペラ式のものであるが、発電効率は良いものの風を受ける方向が単一方向と制限されるため今回は採用していない。運搬と設置に関しては、富士山山頂に機材を運び上げ、約1時間で設置を完了し風力と太陽光による発電により小型バッテリーに充電が出来ることを確認した。運転試験での計測項目として、風向き、風速、風力発電回転数、積算発電量を記録した。

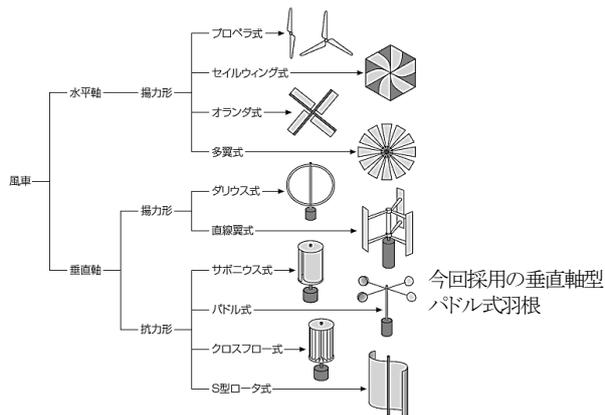


図2. 風力発電 羽根型式一覧 参考文献 3) 6ページ

また、合わせて発電システムの運転状態を無線WEBカメラによりインターネットを利用して遠隔監視も実施し、図3に示すWEBカメラによる状況写真の撮影も行った。撮影間隔は遠隔設定により任意で調整が可能で撮影データは、クラウド上に保管することで地上にいても機器の監視に加えて周辺の気象変化についても確認することが出来た。なお、当該カメラは計測者の管理の下で実施した。



図3. WEBカメラシステムによる状況写真

3. 風力発電運転試験結果

山頂測候所での運転試験は、2018年7月23、24日の二日間連続して実施したが、一部計測機材の不備もあり採取出来たデータから一部の抜粋結果を纏めたものを以下に示す。なお、風向き、風速の気象データは山頂での計測データを使用している。

富士山山頂の風向きデータを図4に示す。2018年7月24日の富士山山頂での風向きの結果から、北側から吹く風(0度および360度方向)が中心であるものの約90度の範囲で風向きは常時変化している。10:48以降は更に風向きの範囲の変化幅は拡大している結果であった。

このことから、特に高所山岳地域での風力発電に関しては、広い範囲で風を受けて発電できる羽根形状が必要になる。風力発電の羽根形状に関しては、水平型と垂直型に大別されるが、風向きが変化する高所では垂直型の羽根を有する風力発電が有利である。

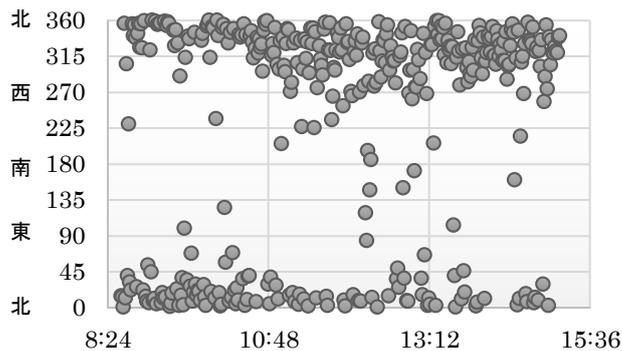


図4. 2018年7月24日 富士山頂 風向

次に、山頂の風速データを図5に示す。計測結果から、8:24 から 15:36 までの計測値として、最小 0.7 m/s、最大 6.6 m/s、平均風速は約 2.1 m/s であった。また、各時間においても風速の変化がみられ、12:00 を過ぎると変化幅も増加する結果であった。

このことから、持ち運びが可能な小型風力発電用の羽根としては、風速が低速であっても回転することが出来る垂直型の抗力タイプが有効である。更には構造を簡易的なものとする事で、羽根の質量を低減することも有効となる。従って、今回採用した垂直軸の羽根を選択したことが妥当であることが分かった。

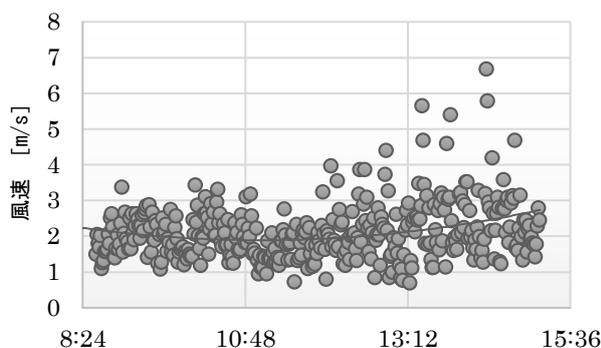


図5. 2018年7月24日 富士山頂 風速

次に、富士山山頂での風力発電システムの羽根回転数データを図6に示す。試験の結果から、8:24から15:36までの羽根回転数計測値として、最大回転数が70 rpmで平均回転数は約20.8 rpmであった。これは、高所山岳地には時折、突風が吹くことがあり午後から夕方にかけて、風速の変化は大きかった。

また、風速との関連性についても風速が増加することで羽根回転数も同様に増加する傾向を示し、風向きが方向が広範囲となっても羽根形式が垂直型であることによる効果を確認できる結果であった。

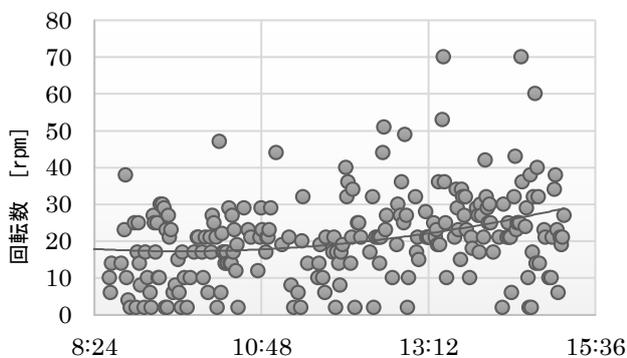


図6. 7月24日風力発電 羽根回転数

最後に、山頂で行った風力試験による発電量データを図7に示す。6時間で約7.0 Whの出力となり1時間当たりの発電量は、約1.16 Whであった。これは、平均風速が約2.1 m/s程度であっても確実に電気出力が得られることを確認した。時

間あたりの発電量は発電機の回転数特性に大きく依存し、今回使用した発電機は100 rpmから出力が増加するものを使用しており、使用条件においては発電機の選定も重要な要素となる。

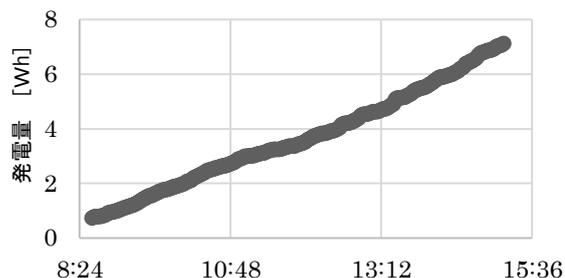


図7. 7月24日 風力発電量積算値

4. おわりに

富士山測候所に風力発電機、太陽光発電パネルを測候所の水槽上に設置し風と太陽によるハイブリッド発電システムの運転試験を行った。風力発電は高所山岳地域での使用を考慮して、風を広範囲で受けることの出来る垂直型の羽根を採用し、360度どこからの風でも回転させ運転することが出来た。

試験結果からは、広範囲から吹く平均風速約2.1 m/sの風を捉えて、風速の変化に追従しながら羽根回転数も平均で約20.8 rpmの結果となった。発電機出力は、回転数に比例し1時間当たりの発電量は、約1.16 Whの結果となった。風力エネルギーにおいて、風車で得られる動力は $P=C_p \times 1/2 \times \rho \times A \times V^3$ となる。

課題としては、より羽根の回転数を上げること、発電機に関しては50から100 rpmの帯域で効率の良いものを選定する必要があり今後の検討を要する。

今回の結果を考察し高所に適した発電システムの研究を進め、ここで得られた知見をネパールを含め広く国内外の関係機関との連携そして共有を目指す。

5. 謝辞

本研究に関する資金の一部は、日本エネルギー設備保安推進協会 (Japan Energy Safety Association) の寄付により行われた。御協力に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 桐原悦雄, マハラジャン ナレス, 片岡信弘, 前田充浩 "ネパール貧困農村のための風力発電導入パイロットプロジェクト", IEICE SWIM2017-13, pp. 27-32.
- 2) 土器屋由紀子, "2009年富士山測候所報告書(速報)"NPO 富士山測候所を活用する会, 2010年.
- 3) 国立研究開発法人 産業技術総合開発機構 風力発電導入ガイドブック(2008年2月改訂第9版).

富士山の岩石で富士山を作る - 小学生向けの火山学習教材の開発とその効果 -

宮下 敦¹

1. 成蹊学園サステナビリティ教育研究センター/成蹊大学教職課程センター/成蹊大学理工学部

1. はじめに

火山の形と噴火のしかたは、中学校理科第二分野において中学校1年生の教科書で扱われるテーマである。日本列島の火山の形はさまざまで、火山をつくる岩石の色などが火山体の形と関係して変化することを確かめた上で、粘性の異なるスライム、石膏、小麦粉、歯科用形取り剤などで火山体を作る模擬実験を行うのが定番の展開になっている。この単元では、実際に生徒実験ができるものが限られていることも、この実験が継続的に教科書で扱われている理由でもある。自然のものを分類するのは自然科学の基本であるし、その分類になんらかの説明を加えるのが理科であるから、楯状火山や溶岩ドームの形が、溶岩の粘性と関係するという説明は間違いとはいえない。しかし、本来は火山の形やその成因は火山ごとの個性を反映してさまざまで、過度の単純化は誤解の元ともなる¹⁾。火山の形は、長期間にわたる火山活動の繰り返しと風化浸食の結果で作られるので、粘性流体を1度流す実験で説明してしまうことには批判もある。いわゆる火山列島に住む日本人にとって、自分が住む地域の火山活動について、より正確な知識を持つ必要があるだろう。

富士山に代表される円錐形の成層火山体の形成について、富士山をつくる岩石を使った簡単なアナログモデル実験により、火山体の形成とその崩壊による地形の形成についてのイメージ検証ができる教材の開発を指向してみた。

2. 富士山の岩石で富士山を作る

本教材は、2016年8月に、学芸大学・鴨川 仁・准教授と山頂観測所に滞在した際に、富士山を訪れた小学生に火山に興味を持ってもらうことを目的として着想した。富士山をつくる火砕岩を観察し、それが積層することで山体が作られ、流水による侵食によって火山麓扇状地が形成されるというストーリーを体験できるものを試みた。

授業方法は、基本的に仮説実験授業²⁾の方法を取り入れ、問題の提示と予想を、実験観察もしくは読み物でイメージ検証をする方法をとった。授業のフローの基本は、

- ① 富士山の位置の確認
- ② 富士山の形の遠望観察 (見えない場合は画像で観察)
- ③ 富士山頂測候所付近の岩石の様子の説明 (画像)
- ④ 富士山をつくる岩石の観察
- ⑤ 火山噴火の様子と富士山の形成史 (動画と読み物)
- ⑥ 富士山の形を富士山の砂で作る (実験)
- ⑦ 火山の一生とハザードマップ (読み物)
- ⑧ 富士山の模型に水を流す (実験)
- ⑨ 富士山の湧水 (動画と読み物)

の順とした。この他の教材として、パワーポイントで提示する富士山やその形成史に関する種々の画像、桜島噴火の様子の動画や柿田川湧水の様子の動画(自作)を準備した。①～⑥の全てを実施すると、45分～50分の授業時間で4回分に相当し、午前と午後に分けて実施して、ほぼ1日分のワークショップとすることを想定した。

火山体模型を作る物質は、インターネット通信販売で盆栽用「富士砂」の商品名で販売されているものを購入した。購入時に、販売元に富士山で合法的に採取されているものであることを確認した。価格は1kgあたり数百円と安価である。富士砂は、洗浄されて粒度をそろえた3～5mm径の粒状の火山岩片からなり、このままでは漏斗を流下しないので、手粉碎で粉碎して粒度を調整し、流動性を持たせた。

桜島火山の噴火を例に、噴煙柱から火山礫や火山灰が降下することを説明した上で、火砕岩に見たてた粉体を、トレーに置いた漏斗台から大きめの漏斗を通じて、少しずつ落下させることで、繰り返し火砕岩片が積層することを模して、円錐形の火山体の模型を作る(図1 A, B)。漏斗の位置をず



A 漏斗を使って山をつくる



B 富士砂でできた山体模型



C 水を流下させた様子

図1 富士砂で作った富士山模型

らせば、山頂の位置を変化させることができる。富士山形成史では、小御岳火山→古富士火山→新富士火山という噴出中心の変化を再現することが可能になる。粉体を落下させる際には、顔を近づけすぎて岩石粉を吸い込まないように安全管理する。

次に、粉体でできた火山体模型に、スポイトを使って山頂付近から水を滴下する。最初は粉体にしみこむが、一定量を超えるとその部分から水が染み出してくる。この現象を富士山周辺に柿田川や忍野八海のような湧水が多く見られることと対応させることができる。さらに水を流すと、山頂部分から崩れて、大沢崩れのようなガレーができる(図 1C)。崩れた物質は裾野に流下して火山麓扇状地の模型が形成される。崩れが進むと次第に山体が円錐形ではなくなり、八ヶ岳のような侵食が進んだ古い火山体が再現される。一連の実験終了後に、使用した粉体はトレー上で乾燥させることで、再利用したり、採取位置に戻したりできる。

3. 武蔵野市立第三小学校での実践

2018 年秋に、武蔵野市立第三小学校から成蹊学園サステナビリティ教育研究センターに、理科の地学分野についての出前授業の要請があり、11月に小学校6年生の理科の時間で火山について扱うことになった。

授業は週1回2時間連続で設定されている理科の時間を利用していただき、1組～3組までの3クラスで実施した。1クラスの人数は三十名前後で、これを4～5名の6班に分かれてもらって実験観察を行った。

今回は、時間の制約から、前述の授業フローのうち①～⑦までを扱った。武蔵野市立第三小学校の校舎からは富士山が遠望できるので、実際の観察も予定していたが、残念ながら天候に恵まれなかった。また、成蹊学園と同じ武蔵野市にあるため、地域連携事業として実施したので、市内の富士塚や吉祥寺から富士山が見える日数、富士山が噴火した場合の市内での降灰の可能性についても触れた。

武蔵野市立第三小学校は、市内の理科の重点校の時期があったとのことで、火山体の立体断面模型や火山弾・火山灰の実物標本などの教材が多数保管されており、授業ではこれも利用させて頂いた。

授業後のアンケートの結果、ほぼ全員が「とても楽しかった」「まあ楽しかった」という評価だった。高評価の理由としては、「富士山の砂を使って富士山を作る実験」「ライトスコープでの富士砂の観察」で説明がよく理解できたことが挙げられており、この実験教材が小学生に高い効果を持つことが実証できた。また、「富士山が次に噴火したらどうなるのか」「噴石で世界で一番大きいのはどのくらいの大きさか」などの質問があり、火山について興味関心がより高くなった。

4. 考察

富士山の岩石から作成した粉体を使って火山体形成のモデル実験を行うことは、火山活動や火山の地形形成をイメージする上で有効であることが示された。

同様の火山噴火のアナログモデル実験の事例としては、小麦粉を用いた林(2017)がある。この実験は、シュリンジを用いて小麦粉をスチロール板にあけた穴から繰り返し噴出させて成層火山体の模型を作る構成となっている。地下から上空に向けて粉体が噴き出すので、火山の噴火をイメージさせる上では、本報告の方法よりも優れている。一方、この方法では噴出中心の移動は再現できないし、小麦粉の代わりに火山砕屑物を使うためには、より細かい粒度まで粉碎する必要があるため、火山の物質を実感しにくくなる。また、小麦粉では、後半の水理の実験はできない。時間があれば両方の実験を相補的に利用することも考えられるだろう。

また、実際に富士山頂や富士山周辺で授業する場合には、授業フローの②の部分では八ヶ岳などの古い火山を見て比較、④の部分では実際に岩石を採取して授業で使用することができればより効果的であろう。また、⑨の部分で、発展として、富士山の多孔質火砕岩に着色した水を滴下して、これがろ過される様子を観察することで、火砕岩が透水性がよいことを示す実験も追加することが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 林信太郎, (2017), 小麦粉で火山をつくろう. (<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/170825.php>, 最終閲覧 2019/2/12).
- 2) 板倉聖宣, (2011), 仮説実験授業の ABC 第五版, 仮説社, 176 頁.



A: 授業の様子



B: ライトスコープで富士砂を観察

図 2 武蔵野市立第三小学校での授業の様子

高所滞在における脳実質変化のMRIでの比較検討

金澤英紀¹, 小森孝洋², 加藤麻衣子³, 星出聡², 苅尾七臣²

1.自治医科大学放射線科, 2.自治医科大学内科学講座循環器内科学部門, 3.加藤クリニックプラザ

1. はじめに

近年、海外登山や高所での観光へ参加する旅行者が多くなり、高山病や登山中の突然死の可能性が高くなっている。1991年、Lake Louiseで開催された第7回 International Hypoxia Symposiumで、急性高山病(AMS)、高所肺水腫(HAPE)、高所脳浮腫(HACE)が提唱されて以来、これらの疾患について研究が進んでいるが、いまだその病態生理については判然としておらず、電解質異常による間質浮腫が中心病態とされており、そこに血管透過性亢進、Na-Kポンプ異常などが加わり、HAPE、HACEが生じると言われている。しかしながら、画像上の脳実質の変化については、報告は少なく日常診療で目にする多くの低酸素脳症と同一の画像所見を呈するのかは不明である。本研究では、日本における最高地点である富士山測候所(3,778m)で滞在中、低酸素に晒される脳の変化についてMRIを用いて画像解析を行った。

2. 方法

対象者;脳・心臓疾患を含め、明らかな治療中の疾患を有さない合計6名(男性、4名;女性、2名;平均年齢±標準偏差、33.8±4.52歳)を研究対象とした。

画像解析;すべての画像は、3T MR装置(Siemens Medical Solutions, Forchheim, Germany)を用いて行った。頭部非造影MR検査は、富士登山前2~4日間および登山後2~4日間にそれぞれ実施。取得した画像はT2強調画像、拡散強調画像、FLAIR画像でいずれも冠状断であった。得られたMR画像については、経験豊富な放射線診断専門医が異常所見の有無や変化について解析を行った。

統計解析;統計解析はSPSS version 21.0 software (IBM, Armonk, NY)を用いて行った。

3. 結果

Table.1に各被験者の背景、Lake Louise Score、SpO₂の平均値、中央値、最低値を示す。なお、富士登山中の外傷や負傷、高山病を除く疾病の発症はなかった。被験者のうち1名(被験者№.6)に富士吉田口登山道終点地点(標高約3,710m)において、頭痛・嘔気・食欲低下症状を主体とする高山病症状が認められた。その後、富士山測候所到着後、被験者№.6においては、嘔吐、食欲低下が顕著となり、夜間就寝中に酸素投与を行っている。

したがって、画像解析には夜間に酸素投与を行った被験者№.6を除く5名を対象とした。MR画像解析の結果、5名の被験者いずれも登山前の画像に異常所見はなく、登山後の画像でも明らかな異常所見の出現は認められなかった(Fig.1)。

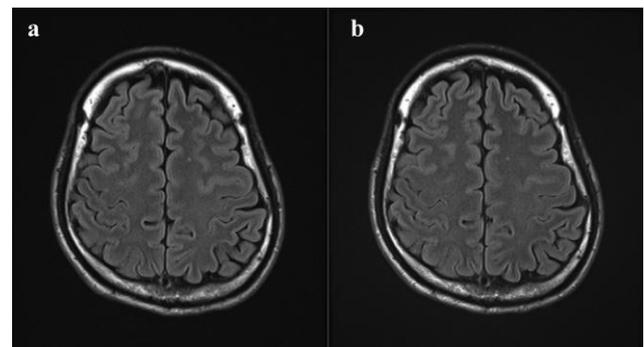


Fig.1 FLAIR images of brain (a,before; b,after)

Table.1 Subjects characteristics and findings of oxygen saturation

No	Age	Sex	Lake Louise Score	SpO ₂ (%)		
				Ave	Median	Min
1	41	M	3	67.9	68.2	47.5
2	36	M	2	61.1	58.3	29.7
3	32	F	4	52.4	50.9	35.3
4	33	M	7	57.8	57.7	34.6
5	35	F	0	80.8	80.6	73.2
6	26	M	7	81.0	80.9	54.4

Ave Average, Min Minimum Value

4. 考察

今回の研究ではいずれの被験者にもMR画像上、明らかな異常所見は認められなかった。過去の報告と比較して最高到達標高が低いことや、滞在期間が短いこと、登山後の平地での生活期間の長さが関与している可能性が考えられた。また、被験者№.6においては最も低酸素の影響を受けたと考えられるが、高山病治療の観点から酸素投与を行っており、その影響を評価することが出来なかった。山頂に画像診断装置があればより正確な評価が可能と思われるが、設置が不可能であるため、物理的に実施可能な範囲での評価とならざるを得ない。今回は登山者を対象としたが、より長く低酸素暴露にさらされた環境での脳実質の変化を評価するのであれば、富士山測候所に長期間滞在する「NPO 法人

富士山測候所を活用する会」の山頂班要員を対象とする方法も考えられる。

5. 結論

今回の研究では、低酸素環境曝露下における明らかな画像上の脳実質に関する異常所見は得られなかった。長期間滞在が難しいことや、医療設備を休日に診療外で使用する制限もあり、画像診断を用いた評価には更なる研究方法の検討が必要と考えられた。

参考文献

- 1) Garrido, E., Castelló, A., Ventura, JL., Capdevila, A., Rodríguez, FA. Cortical atrophy and other brain magnetic resonance imaging (MRI) changes after extremely high-altitude climbs without oxygen. *Int J Sports Med*, 14, 232-234.
- 2) Sutherland, AI., Morris, DS., Owen, CG., Bron, AJ., Roach RC. Optic nerve sheath diameter, intracranial pressure and acute mountain sickness on Mount Everest: a longitudinal cohort study. *Br J Sports Med*, 42,183-188

高所滞在における血行動態の検討

小森孝洋¹, 金澤英紀², 加藤麻衣子³, 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科, 3.吉祥寺病院精神科

1. はじめに

循環器疾患患者には運動療法として有酸素運動が薦められている。登山は有酸素運動主体の運動であり、運動療法のひとつになりうると考えられる。しかし、高所は低酸素環境であり、登山行動中や短期間の高所滞在中に血行動態がどのように変化するかは明らかでない。循環器疾患の患者にとって、登山が運動療法として適しているかは明らかではなく、安全性も不明である。

登山行動中の血行動態は、測定が困難であることから明らかになっていない。登山行動中は高所による高度変化、気温変化、低酸素などの環境要因や交感神経活動の亢進、登山の労作などから、血圧上昇が生じる¹⁾。この血圧の変化が心血管疾患発症による突然死のリスク因子となっている可能性がある。

我々は気圧計・温度計・アクチグラフを内蔵するマルチセンサー自由行動下 24 時間血圧計を開発した。本装置は血圧・脈拍だけでなく、気圧・気温などの環境因子、活動量を同時に測定することが可能である。本装置を登山行動中に用いることにより、登山行動中の血圧に影響を与える因子が明らかになることが期待される。本研究では、健常人を対象に登山行動中および短期間の高所滞在中の血圧、低酸素に関連した生理的反応を明らかにすることを目的として研究を行った。

2. 方法

(1)対象: 心血管疾患のない健常人 6 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。登山日とは別の日程で日常生活時の 24 時間血圧測定を行う。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。), 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 24 時間血圧変化の差異, 登山行動中の血圧と登山内容の関連性, 睡眠中の血圧値と酸素飽和度の変化。

3. 結果

平成 30 年 8 月 4 日～5 日に研究を実施した。対象者は健常人 6 名(男性 4 名, 女性 2 名)。職業は医師 5 名, 会社員 1 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。下山後, 平地で日常生活での血圧測定も実施した。表 1 に被験者の背景を示す。

表1. 被験者背景

	年齢(歳)	性別
被験者 A	41	男
被験者 B	36	男
被験者 C	32	女
被験者 D	33	男
被験者 E	35	女
被験者 F	26	男

登山行動中, 被験者 A～E は覚醒時血圧が高く, 就寝時血圧が低下する Dipper 型もしくは Extreme dipper 型血圧変動を呈していた。被験者 F は登山行動中に高山病となり, 富士山測候所内では 2L/分の酸素吸入を行いながら過ごした。被験者 F は就寝時血圧が低下しない Non dipper 型血圧変動を呈した。夜間の酸素飽和度については, 被験者 A～D は 50～60%台まで値が低下し, 3%ODI も 40～90 と非常に高値を示した。

日常生活での血圧値・血圧変動測定は被験者 C 以外で可能であった。うち 3 人では Dipper 型血圧変動, 2 人に Non dipper 型血圧変動を認めた。酸素飽和度はいずれの被験者も 95%以上であり, 3%ODI も 10 未満であった。

登山行動中と日常生活での計測値の比較を行った(表 2)。登山行動中の 24 時間収縮期血圧, 覚醒時収縮期血圧は日常生活に比べて有意に高値であった。3%ODI, 平均 SpO₂, 活動量, 平均気圧は, 登山行動中と日常生活での比較では有意差はなかった。平均気温は日常生活中においては有意に高値であった。

登山行動中の血圧値に関連する因子を検討するために, 血圧値と活動量, 気温, 気圧, SpO₂ との相関を検討した(表 3)。24 時間拡張期血圧, 覚醒時収縮期血圧, 覚醒時拡張期血圧, 夜間血圧下降度は活動量と有意な相関を認めた。3%ODI, 平均酸素飽和度, 気温, 気圧, レイクルイーズスコアと血圧値には相関関係は認められなかった。

表2. 富士登山中と日常生活の測定値の比較(n=5)

	富士登山	日常生活	p-value
24 時間収縮期血圧 (mmHg)	117.8±5.4	111.4±5.8	0.04
24 時間拡張期血圧 (mmHg)	79.2±3.6	75.6±6.7	0.12
24 時間脈拍 (bpm)	89.4±12.2	64.8±6.2	0.22
覚醒時収縮期血圧 (mmHg)	123.4±6.9	115.2±7.2	0.03
覚醒時拡張期血圧 (mmHg)	84.0±5.4	78.8±8.3	0.06
覚醒時脈拍 (bpm)	94.6±12.1	68.8±6.9	0.21
睡眠時収縮期血圧 (mmHg)	103.2±5.0	102.0±5.3	0.37
睡眠時拡張期血圧 (mmHg)	67.2±1.8	67.4±3.8	0.92
睡眠時脈拍 (bpm)	77.4±12.5	54.8±6.7	0.38
夜間血圧下降度 (%)	16.0±5.0	11.4±3.8	0.22
3% ODI	48.6±36.0	4.8±2.0	0.51
平均 SpO2 (%)	69.7±10.9	95.9±0.4	0.60
log 活動量 (G)	10.6±0.2	9.9±0.5	0.41
平均気温 (°C)	22.3±0.72	29.4±1.2	<0.01
平均気圧 (hPa)	723.3±3.6	1001.0±9.8	0.53

表3. 血圧値と関連する因子

	24 時間 収縮期 血圧 (mmHg)	24 時間 拡張期 血圧 (mmHg)	覚醒時 収縮期 血圧 (mmHg)	覚醒時 拡張期 血圧 (mmHg)	睡眠時 収縮期 血圧 (mmHg)	睡眠時 拡張期 血圧 (mmHg)	夜間血 圧下降 度 (%)
3% ODI	0.64	0.65	0.55	0.58	0.48	0.4	0.17
平均 SpO2 (%)	-0.82*	-0.8	-0.81	-0.75	-0.17	-0.2	-0.56
log 活動量 (G)	0.78	0.92**	0.89*	0.95*	-0.31	-0.43	0.92**
平均気温 (°C)	0.51	0.25	0.37	0.26	0.7	0.04	-0.15
平均気圧 (hPa)	-0.26	-0.07	-0.27	0.01	0.08	-0.52	-0.28
ルイクレイーズ スコア	0.14	-0.4	-0.04	-0.43	0.72	0.42	-0.49

*: P<0.05, **: p<0.01

4. 考察

富士登山中および日常生活の血圧値および血圧変動を評価した。これまでに高所での血圧変化を検討した研究が報告されているが、登山行動中および短期間の高所滞在中の血圧変化を検討した研究はこれまでにない。本研究では登山行動中の血圧レベルが活動量と有意に関係することが明らかになった。

登山行動中の血圧と活動量の関係性は、活動量と血圧を検討したこれまでの研究でも示されている。健常人の運動時に血圧上昇が伴うことは、トレッドミル負荷試験などから明らかであり、アクチグラフを内蔵した 24 時間血圧計での検討でも、活動量と血圧値の間に相関関係が認められることが報告されている²³⁾。本研究結果も登山という労作に伴って血圧が上昇したものと考えられる。実際、登山行動中の血圧レベルは、活

動量が登山に比べて少ない日常生活の血圧レベルと比較すると有意に高値であった。

登山中の血圧上昇に影響する因子として、高所の影響は排除できないと考える。しかし、登山中の血圧値と気圧、高山病スコアの間に関連性は認められなかった。高所で生じる急性高山病は血圧値に影響を及ぼすことが推察され、今回の研究では、高山病を発症した被検者 F において、Non dipper 型血圧日内変動異常が出現した。Non dipper 型血圧変動異常は睡眠時の血圧が十分低下しないパターンでの血圧日内変動異常であり、その一般的な原因としては睡眠時呼吸障害、体液貯留、自律神経障害等が知られている⁴⁾。高所曝露も交感神経を亢進させ、心血管系へも影響を及ぼすことが知られている^{15,6)}。急性高山病では低酸素に伴い、頭痛、消化器症状、倦怠感、めまい、睡眠障害などの症状が出現する。これらの身体的ストレスや低酸素そのものが交感神経活性を亢進させたと思われ、日中の富士登山により血圧が上昇していたにもかかわらず、夜間においても血圧低下が不十分となり、血圧日内変動パターンとしては Non dipper 型を呈したと考えられる。被検者 F へは急性高山病への対処として酸素投与を行ったが、酸素投与を行わなかった場合、睡眠時血圧の上昇する Riser 型血圧日内変動異常が出現した可能性が考えられるため、酸素投与により夜間の血圧上昇が抑制され、Non dipper 型にとどまると

推察する。

5. おわりに

本研究では登山行動中の血圧値に活動量が関係していることが示されたが、その他の修飾因子としては自律神経の影響が大きいことが推測された。今後は高所での自律神経の影響と血圧値の関係性を検討するための更なる研究が必要であると考える。

参考文献

- 1) Bartsch P and Gibbs JS. Effect of altitude on the heart and the lungs. *Circulation* 2007; 116: 2191-2202.
- 2) Kario K, Schwartz JE and Pickering TG. Ambulatory physical activity as a determinant of diurnal blood pressure variation. *Hypertension* 1999; 34: 685-691.

- 3) Kario K. Morning surge in blood pressure and cardiovascular risk: evidence and perspectives. *Hypertension* 2010; 56: 765-773.
- 4) Kario K. Time for focus on morning hypertension: pitfall of current antihypertensive medication. *Am J Hypertens* 2005; 18: 149-151.
- 5) Duplain H, Vollenweider L, Delabays A, Nicod P, Bartsch P and Scherrer U. Augmented sympathetic activation during short-term hypoxia and high-altitude exposure in subjects susceptible to high-altitude pulmonary edema. *Circulation* 1999; 99: 1713-1718.
- 6) Wolfel EE, Seland MA, Mazzeo RS and Reeves JT. Systemic hypertension at 4,300 m is related to sympathoadrenal activity. *J Appl Physiol* 1994; 76: 1643-1650.

酸素需給バランスからみた高山病の病態解明

清水健太郎¹、蛭原健¹、光山裕美¹、塩飽堯之²

¹大阪大学大学院医学研究科救急医学、²大阪急性期・総合医療センター

1. はじめに

富士山や、北アルプスなどの3000m級の山に多くの登山客が訪れ、その数は富士山だけで年間25万人以上である。高山病を呈すると大多数は頭痛や消化器症状に止まるが、中には肺水腫や脳浮腫などの致命的な症状を呈する症例もある。高山病の診断、治療に関してはまだ確立されたものは少数であり、その病態解明は重要な課題である。

2. 目的

本研究では高山病は酸素需要に対する酸素供給の負債、または、酸素利用の障害が病態の本質と仮定して、高所における酸素の需給バランスを酸素の運搬能に注目し、酸素拍出量と血液検査を行った。

3. 方法

富士山に登頂し富士山測候所にて宿泊した健康成人11人を対象とした。

- 登山行程において適宜バイタルサイン測定（脈拍、血圧、酸素飽和度（SpO₂）、表面温度）を行った。
- 富士宮市の宿舎（標高120m）、測候所（標高3775m）、下山後の5合目（標高2380m）の3箇所静脈血液の血液ガス分析、生化学検査、ヘモグロビン濃度を測定した。またエドワーズ社製のクリアサイトシステムを用いて富士宮市の宿舎（標高120m）、測候所（標高3775m）における心拍出量を測定した。
- Lake Louise Acute Mountain Sickness scoreを用いて頭痛を含み合計3点以上をAMSと定義した。測候所到着後1時間、6時間、12時間の3時点でAMS scoreを評価し、2回以上AMSであったものを高山病と診断した。高山病と診断したものは3回の測定のうち最高のAMS scoreを用いて軽症：3～5点、中等症：6点以上と分類した。

高山病とバイタルサイン、血液所見、心拍出量の関連を検討した。

4. 結果

山行前日は富士宮市内の宿舎に宿泊し、早朝に5合目まで車両で移動し、その後、約10時間かけて富士山に登頂した。測候所で滞在した後、翌日下山した。

本山行において高山病を呈したものは6人おり、軽症3人、中等症以上3人であった。登山者の背景を高山病の有無も合わせて表1に示す。年齢の高い男性に高山病を発症した登山者が多い傾向があった。そのほかの測定項目に高山病の発症の有無での特記すべき特徴はみられなかった。

脈拍数およびSpO₂の推移を図1に示す。高度ともに脈拍数は上昇し、SpO₂は低下した。高度が上がるに伴って、個人差は顕著であった。

図2に採血結果を示す。高度上昇に伴い血中CO₂（PvCO₂）が低下し、pHが上昇した。

心拍出量は、低地では平均5.5L/分から高地では6.7L/分に上昇した。特に、高山病を呈した登山者では心拍出量の顕著な増加が見られた（図3）。一回拍出量は平均82.9mL/回から69.5mL/回まで低下していた。心拍数は平均67.8回/分から96.2回/分まで上昇した。高所で安静にて滞在した後でも心拍出量の増加は継続していた。

5. 考察とまとめ

1. 心拍出量測定について

心拍出量を測定するには、ICUで用いるカテーテルでの測定が必要であるが、本研究では指に装着して非侵襲的に血圧や心拍出量を測定できるクリアサイトシステムを用いて測定を行った。観血的処置が困難である高地での測定に有用な手段のひとつと考えられた。

本研究では、高地での心拍出量は増大した。特に、高山病症状の強いものにおいて、その傾向は強かった。酸素運搬量はヘモグロビン濃度、心拍出量、動脈血酸素飽和度に大きく依存する。Hbは短期間では大きくかわらず、高度による酸素飽和度の低下を代償するには、心拍出量を増やす必要があるためと考えられた。過去の報告では、一回心拍出量に伴って心拍数が増加して心拍出量は変化がないことが報告されている。しかし、本研究では、心拍出量は低下するものの心拍数の上昇が著しいため心拍出量としては増加して、急激な高度上昇に生体に対応していると考えられた。

また、高山病症状に強いものに関して、その傾向が強くみられたことから、酸素供給を代償するための生体応答を心拍出量の増大で補っていることを示唆していると考えられた。

2. アルカローシスの進行について

高度の上昇にともなってpHは上昇していた。高所の場合に酸素解離曲線を考えた時、呼吸性のアルカローシスは動静脈の酸素飽和度の差が右方移動に比して大きい。つまり酸素運搬量においてアルカローシスは有効な手段である²。高地において、呼吸性アルカローシス下で、心拍出量をあげることは、生体において酸素運搬量を最大化している結果と考えられた。

高齢者登山が増加している現代において、富士山登山のように一気に高地にのぼるには、心機能に予備能力がなければ酸素供給が不十分になり様々な高山病症状が出現する可能性がある。たとえ、ヘリコプターで高地へ降り立ったとしても、その高さでの低酸素を補完できる心機能がなければ、耐えることは不可能である。その場合は、ヘモグロビンが上昇するまでの順応期間が必要だと思われる。今後、日常生活や負荷時の心機能が安全登山のための指標となる可能性がある。

参考文献

1) Bousuges A, Molenat F, Burnet H, Cauchy E, Gardette B, Sainty J. M., Jammes Y., Richalet J. P. (2000). Operation Everest III (Comex '97): modifications of cardiac function secondary to altitude-induced hypoxia. An echocardiographic and Doppler study. *Am J Respir Crit Care Med*, **161**, 264-270.

2) 薊 隆文. (2015). 高地における酸素解離曲線の移動 右方移動と左方移動、どちらが有利か? 名古屋市立大学看護学部紀要, **14**, 1-8.

表1

	全体(n=11)	高山病あり(n=6)	高山病なし(n=5)
性別 (男/女)	5/6	4/2	1/4
年齢 (年)	30 (24-41)	37(31-42)	24(24-28)
体表面積 (m ²)	1.60 (1.46-1.72)	1.68 (1.49-1.79)	1.56 (1.46-1.63)
心拍数 (bpm)	67 (63-77)	71 (59-77)	66 (65-78)
SpO2 (%)	98 (98-99)	98 (97-99)	98 (98-99)
pH	7.36 (7.33-7.38)	7.36 (7.35-7.38)	7.35 (7.34-7.41)
Cardiac Index (L/min/m ²)	3.4 (2.8-3.9)	3.4 (2.7-3.6)	3.4 (2.9-4.9)
SVI (ml/m ²)	52.4 (45.5-57.0)	52.4 (47.1-56.2)	50.7 (44.6-62.5)
Hb (g/dL)	13.9 (13.3-14.6)	14.1 (13.0-15)	13.6 (13.3-14.3)

*Median(IQR)

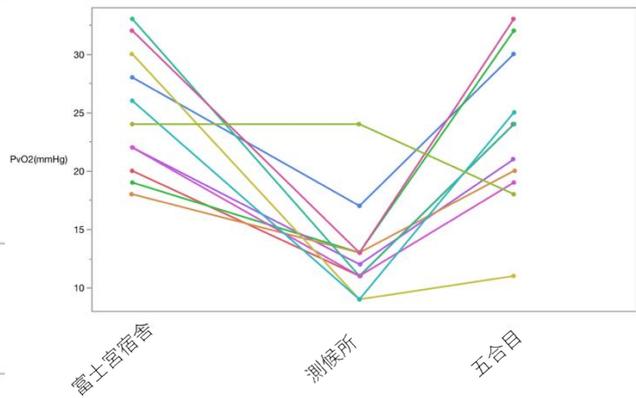
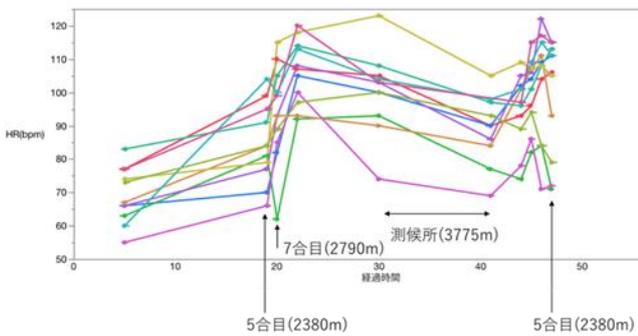
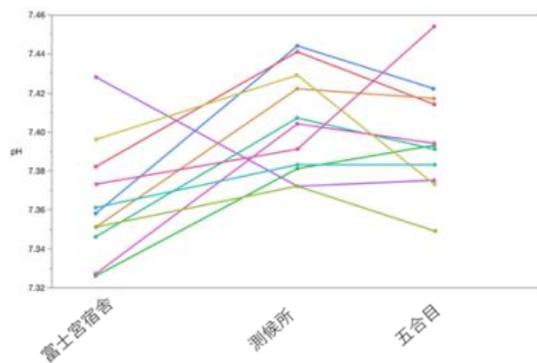


図2

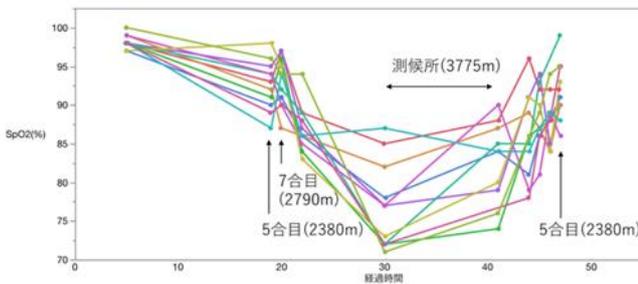


図1

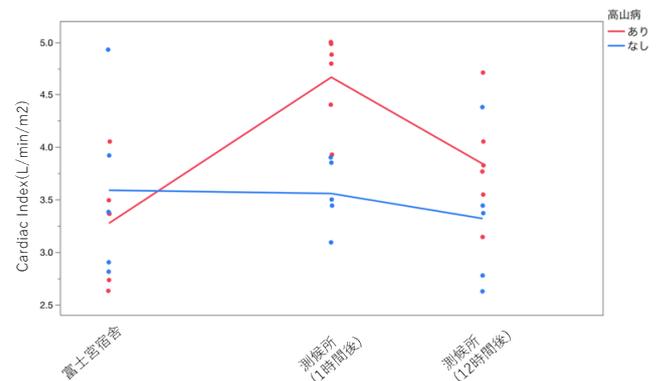


図3

地域の自然資源ならびにリスクのモデル化とその持続的管理のための 統合的手法の開発(富士山, 日本)

Integrated Methods for Modeling and Sustainable Management of Regional Natural Resources and Hazards (Mt. Fuji, Japan)

Chris S. Renschler¹ and Taku Nishimura²

1. University at Buffalo (SUNY) , 2. The University of Tokyo

The project goal was to explore the existing erosion and deposition patterns along the trails to the peak of Mt Fuji and explore available weather/climate data sets to potentially simulate the pattern along selected hillslopes and trails. The results could potentially be used to communicate and explore alternative Best Management Practices (BMPs) to maintain the trails and surrounding hillslopes through integrated methods of modeling and sustainable management of regional natural resources and hazards. This initial project was intended to explore the situation on-site and discuss in the near the future possibilities for collaborations to Figure 1: Micro earth pyramids erosion pattern near the begin of the Yoshida Trails, Mt Fuji (Aug 11 2018) apply a process-based soil erosion model (WEPP/GeoWEPP).

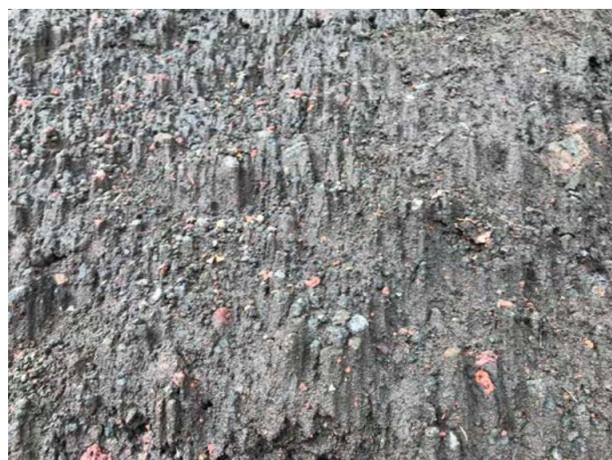


Figure 1: Micro earth pyramids erosion pattern near the begin of the Yoshida Trails, Mt Fuji (Aug 11 2018).



Figure 2: Erosion (left) and deposition pattern (right) observed along the heavily used downward trail near the Shita-Edoya (branch point) of Yoshida Subashiri Trails, Mt Fuji (after Thunderstorm passing and steady rain fall on Aug 12 2018).

The photos illustrate some teachable moments of Earth Systems and Soil Erosion at the small scale (1 m² plot in figure 1) and larger hillslope scale (> 20 meter hillslope in figure 2) along a transect from the starting point of the most popular trails to the summit (e.g. for undergraduate students in introductory courses to Earth Systems Science and Soils Sciences). The visit of the MFRS enabled to explore these erosion and sedimentation pattern along this transect and to discuss potential

on-site measuring and modeling experiments in the future. The measurements and modeling data can then be used to communicate effectively teachable moments about changes of Earth Systems as well as soil surface conditions and processes along this transect (e.g. changes in elevation/weather/climate/vegetation/soil properties) and responses to rainstorms throughout the seasons or multiple years.