

桜島での火山噴煙濃度航空機観測

Airborne Measurements of Concentration of Volcanic Plume from Mt.Sakurajima

吉谷純一・Jónas ELÍASSON・味喜大介・安田成夫⁽¹⁾・桃谷辰也⁽²⁾

Junichi YOSHITANI, Jónas ELÍASSON, Daisuke MIKI, Nario YASUDA⁽¹⁾ and Tatsuya MOMOTANI⁽²⁾

(1) 独立行政法人土木研究所

(2) 一般財団法人日本気象協会

(1) Public Works Research Institute

(2) Japan Weather Agency

Synopsis

This report summarizes current progress of ongoing research on airborne measurement of mass concentration of volcanic plume from Mt.Sakurajima. First, we discuss issues on improvement of volcanic ash dispersion prediction models, which help aviation control during volcanic eruption. Second, we summarize procedure of airborne measurement and data processing. Third, we demonstrate partially-successful two cases of high concentration airborne measurement in the vicinity of plume edge and in the middle of streak fallout of ash in comparison with X-band radar images.

キーワード: 火山灰, セスナ機, TSP, レーダ, 桜島

Keywords: Volcanic ash, Cessna plane, Total Suspended Particle, Radar, Sakurajima

1. はじめに

大規模な火山噴火が発生すると、火山灰は大気中で広域に亘り拡散する。高濃度の火山灰中を航空機が飛行すると、ジェットエンジンが損傷し停止に至る場合もある(安田ら, 2011)。火山灰との遭遇を避けるため、火山灰雲の現位置と予測情報が必要となる。衛星画像が利用できる場合もあるが、火山灰雲を確実かつ常にモニターする観測システムは存在しないため、火山灰の大気中での移流拡散を気象学的に予測した情報を参考にすることになる。

この予測は全般的に精度上の大きな課題を抱えている。現在まで、1991年1月27日の雲仙と2000年8月18日の三宅島での火山噴火を含む、83件の民間航空機の火山灰遭遇が世界各地で報告され(Onodera, 2013)、その中のいくつかは火山灰雲の予測誤差が遭遇の大きな原因となっている。例えば、2000年ア

イスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火時のロンドン航空路火山灰情報センターの火山灰拡散範囲の予測は、あまりにも過大であり、その結果、不必要な航空規制をする結果となり、莫大な損害を航空会社と利用者にもたらしたと批判された(安田ら, 2011; Eliasson, 2013)。過大な予測例がある一方で、火山灰なしと予測された区域を飛行中に火山灰に遭遇し、飛行機エンジンが損傷した例も報告されている(Onodera, 2013)。

このような問題意識を背景に、京都大学防災研究所は航空機による浮遊火山灰濃度の原位置観測研究を実施してきた(安田ら, 2012; 安田ら, 2013)。本報は、現在までに構築された観測手法・体制と課題、及び、現在までの観測結果を報告するものである。

2. 研究の目的と体制

本研究は、広域災害が発生するような大規模火山噴火時に、飛行機の火山灰遭遇を発生させず、なおかつ、不必要に経済被害を発生させない判断のため、火山灰移流拡散予測の信頼性向上に資する情報を得ることができる観測システムの構築を目的とする。具体には、火山灰移流拡散予測モデルのソース項となる火山灰放出量と粒径分布を、推定値ではなく大気中で直接観測すること、噴煙やそこから降下する火山灰濃度の空間的分布を観測し、火山灰の移流拡散予測の実時間で校正に用いること、火山灰濃度が安全な飛行にとって十分に低いことを観測で直接確認することである。なお、エイヤフィヤトラヨークトル火山噴火の大混乱が続く中、EU緊急運輸相理事会で決定した基準は、火山灰濃度を3段階に分け、 $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下が「通常飛行可能」、 $0.2\sim 4\text{mg}/\text{m}^3$ の範囲が「事前許可が必要 ($2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下のとき)」、あるいは「条件遵守で飛行可能；飛行時間の制限 ($2\text{mg}/\text{m}^3$ 以上のとき)」、 $4\text{mg}/\text{m}^3$ 以上は「全面飛行禁止」としている(安田ら, 2011)。

観測研究は小型飛行機を飛行させ大気中の火山灰濃度を計測することを基本とする。その対象は桜島とした。その理由は、桜島は、気象庁によると2013年に1927回の爆発的あるいは一定規模以上の噴火があったように、頻繁に観測の機会があること、鹿児島空港が桜島の近傍にあるため、爆発的噴火を確認した直後に観測用飛行機を離陸させ観測を即座に開始できること、京都大学防災研究所火山活動研究センターによる種々の観測資料や知見が充実していることによる。

観測は、遊覧飛行等に用いる民間のセスナ機に観測機材を搭載して行う。セスナ機は、1週間弱の期間独占利用の予約をし、最初に観測機材をセスナ機に載せ、以降のセスナ機予約期間(campaign)の間、鹿児島空港でいつでも飛行できるようスタンバイする。セスナ機の飛行は昼間の視界がきく場所で可能である。観測可能な天候時に桜島が噴火したとき、観測飛行を行う。火山活動研究センターによる地盤の伸縮観測等から直近の噴火が予測される場合は、噴火を待たずに飛行し、上空で爆発的噴火を待つこともある。飛行計画は、桜島ライブカメラ、天気概況、天気予報等の情報から予め作成するものの、実際は飛行しながら噴煙の状況を目視で確認し、パイロットの安全判断を得た上でその都度決定する。有視界飛行ができない高濃度の噴煙中あるいは雲中の飛行や噴石の到達可能範囲は飛行できない。過去4回の一連の観測中、3回は噴煙の観測に成功している。

なお、研究開始当初は無人飛行機の利用を試行した(安田ら, 2012)が、地上からは把握困難な局所的

な乱気流により墜落の危険があること、重量制限のため搭載できる観測機材に限られることから、小型航空機利用を前提に研究を進めている。

本研究は桜島を対象にするものの、長期的には海外を含むいかなる火山の噴火時にも使用できるシステム構築を念頭に置いている。そのため、アイスランド火山噴火時の観測と航空規制の教訓を有するアイスランド大学、デュセルドルフ応用科学大学と共同で桜島観測を行ってきた。また、SATREPS「火山噴出物の放出に伴う災害の軽減に関する総合的研究」(研究代表：井口正人教授)のサブプロジェクトのひとつとしても位置付け、インドネシア国との技術交流も予定している。さらに、今後、科学技術・学術審議会「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について(建議)」としての一研究として位置付ける予定である。

また、鹿児島大学・防災科学技術研究所と防災研究所の共同研究と連携し、Kaバンドレーダ、LIDAR、地上降灰観測との同時観測を2014年5月の第4回一連観測期間に試みたが、この間に爆発的噴火がなく、同時観測はできなかった。

3. 観測システムの将来像

火山灰の移流拡散予測は、火口からの火山灰の放出・上昇、火山灰の降下を伴いながら上空の風による水平方向の移流拡散からなる。予測の誤差の原因は、第一に上空の風場の予測誤差であり、予測モデルは衛星画像との比較による検証が必要である(田中, 2003)。

さらに、Eliasson(2013)は、予測の誤差原因として、予測式のソース項である火山放出量の推定値が過大な傾向にあること、噴煙から縞状に火山灰が降下する現象の予測理論がないこと、拡散式の利用が本質的に間違いである可能性の3点を示している。

ソース項に関し、桜島では、長年の鹿児島県での面的に密な地上降灰量観測と地盤の伸縮観測から火山灰放出量の現時刻予測が可能となっている(井口, 2012)。しかし、他の火山では必ずしもこのような予測できないため、火山灰放出量は噴煙高度に応じた推定値を仮定する方法が一般的である。

火山灰の降下に関し、噴煙からの火山灰は、一般的に、大粒径の重い粒子ほどすぐに降下するため、放出から時間が経過した噴煙ほど小粒径の割合が大きくなる。予測モデルでは粒子の静水中の沈降速度の式で表現される。しかし、実際の現象は非常に複雑であり、限られた観測結果では上記の一般的傾向とは異なることも多い。



Photo 1 Satellite image of plume from Eyjafjallajökull volcano on May 11, 2010. Width of plume expands little with advection. Source: NASA Goddard/MODIS Rapid Response Team

拡散式理論の適用は不適合との指摘は、Photo 1のように噴煙は風が一定であれば何百km移流しても噴煙幅はわずかに広がるだけである観察からの推論である。これから、Eliasson (2013)は拡散係数に応じた速度で噴煙は拡散するのではなく、水上の油が広がるのと同じように重力で変形すると推論している。この推論は提起されたばかりで、観測や実験による裏付けもない状況なので、すぐに予測に反映される訳ではない。

航空機による火山放出量は、Fig. 1のように噴煙中をジグザグに飛行観測し推定するのが理想である。火山灰濃度が小さい噴煙では、噴煙中の飛行は可能であり、十分な数の測線での観測から噴煙断面の平均濃度を算出できる。しかし、高濃度の噴煙中は飛行不可能で、飛行観測はFig. 2のアイスランドでの観測のように噴煙の周辺部分のみで可能である。この場合、噴煙断面中の濃度分布を仮定し、噴煙外縁部分での観測から噴煙断面全体の濃度分布を外挿で推定することはできるが、濃度分布の実態は不明であり、噴煙濃度の予測精度は非常に低くなると考えられる。

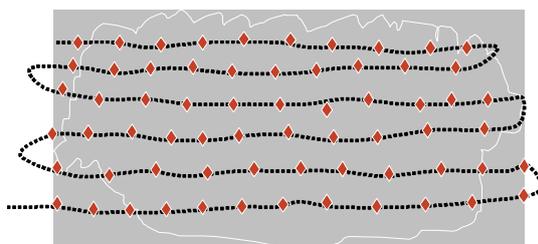


Fig. 1 Conceptual drawing of zig-zag measurement in a cross-section of plume. Red-color diamonds denote measurement points and dash line denotes flight path.

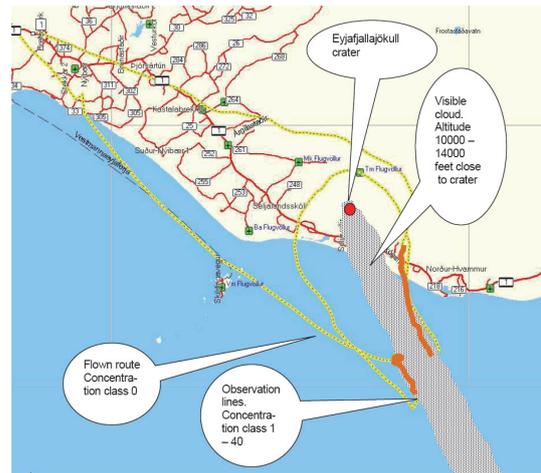


Fig. 2 Eyjafjallajökull volcano plume on May 11, 2010. Hatched area is plume and orange color lines are paths of airborne measurement by the University of Iceland group.

気象レーダによる火山灰濃度の定量観測は期待されているが、火山灰粒子の散乱特性の理論的な研究（真木, 2014）が開始された段階にある。Cバンド、及び、Xバンドレーダによる噴煙の把握事例では、降雨粒子との識別が困難である等の理由により必ずしも噴煙を把握できていない。噴煙がレーダで観測されても、まもなくレーダエコーが消える例が確認されている。レーダは大粒径のみの火山灰観測が可能なのかもしれないが、その判断のためには、観測研究の進展を待つ必要がある。また、レーダで、噴煙の高さ、大きさ、位置を正確に特定することも期待される。現状では、ライブカメラや目視で確認するが、気象条件次第という欠点を有している。

将来的に、航空機観測により飛行経路における信頼性の高い観測を行い、レーダから得られる空間的観測と併せて火山灰濃度情報を得るシステムの構築が期待される。

4. 航空機観測・データ処理の方法

飛行ルート上の大気中火山灰濃度を観測するために必要な観測機材は、(1)粉塵計 [安田ら(2013), photo 6], (2)火山灰粒子を捕捉するインパクトフォルダー及び一定流量吸引ポンプ[安田ら(2013)のPhoto 3], (3)外気を粉塵計とインパクトフォルダーへ導くダクト[安田ら(2013)のPhoto 6], (4)航路を記録するGPS, (5)フィルター付着火山灰の重量を計測する質量比較器である。

これらを用いた作業全体の手順は以下のとおりである。飛行しながら、大気中の火山灰濃度を(1)で連続観測し、(2)で粒径別火山灰粒子を捕捉する。飛行

観測終了後に、火山灰が付着したフィルターの重量を(5)で計測し火山灰重量を算出し、(1)観測値の積算火山灰量から補正係数を算出し、(1)観測値を補正する。(2)の観測結果がない場合は、火山灰粒子の密度、過去の桜島噴煙の火山灰粒子では $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ (安田ら, 2013), を補正に用いる。そして、GPSデータと濃度データを用いた3次元の図化を行う。

(1)は、Turnkey Instrument社のDustMateを2台(1台はアイスランド大学, もう1台は防災研究所所有)用意した。DustMateはレーザ光の散乱によりTSP(Total Suspended Particle), PM10, PM2.5, PM1を計測し、本体メモリーに計測値を記録する。観測終了後にwindows用専用ソフトウェアで観測値をアップロードする。計測値は 1m^3 当り質量で出力されるが、これは計測対象の粒子密度が $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ のときの濃度値となっている。粒子密度がこれと異なるときは、mass conversion factor (デフォルト値は1)を本体で設定し、補正済の濃度値を出力させることもできる。我々はこの設定はデフォルトのままとし、データ処理時に補正を行った。また、DustMateはミリグラム及びマイクログラムの2つの観測モードがある。マイクログラムモードでは、TSPが測定限界を超えると $6527.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mass conversion factor=1のとき)と表示される。過去の計測値を見ると、 $3000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度を超えると計測不能となり $6527.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ を表示するようになる。この点は未だに確認できていない。

DustMate利用にあたって、いくつかの留意点がある。まず、内部時計が不正確であり、計測開始直前に内部時計の時刻を修正する必要がある。内部時計はPC用専用ソフトウェアで通信するとき強制的にPC内部時計時刻に修正される。また、最小計測間隔1秒の設定モードでは瞬時観測値が記録されるが、それ以上の間隔の測定モードに設定すると、1秒間隔の瞬時測定値の平均値が記録される。また、1秒間隔の計測では1時間弱の計測で内部メモリーが満杯になり、計測値をPC接続で読み込みメモリーを解放しない限り、それ以降の記録はできなくなる。

なお、DustMateは安価で取扱いが簡単なため利用しているが、粒径分布を計測しようとする高濃度を計測できない、高濃度を計測するために予めミリグラムモードに設定するとTSPのみの計測のみとなるという制約があるため、利用目的は限定されると考えている。

(2)は、当初 $5000\text{cc}/\text{min}$ で吸引するポンプに、この吸引流量値用で粒子径 $2.5\mu\text{m}$, $10.0\mu\text{m}$ で分級するインパクトフィルターを設置したフォルダで火山灰粒子をフィルターで補足し、吸着した火山灰重量を計測した。重量計測は 0.01mg 精度で計測可能な質量比較



Photo 2 Cessna plane used for airborne measurement and magnified photo of air scoop. This Cessna has the capacity of 4 people and can go up to approximately 2400m attitude.

器を用いたが、フィルターに付着する火山灰重量が計測不能なほど微量となる場合が多々あるので、最大吸引流量 $30\text{L}/\text{min}$ の大流量のポンプと $20\text{L}/\text{min}$ 用のインパクトフォルダを別途用意した。

(3)は、セスナ機のエアスクープ(外気取入れ口, Photo 2)から機内に入る外気を蛇腹管でつないだ製作品である。地上の大気質計測とは異なり高速で飛行しながら計測するためには、空気流の断面積や方向をできるだけ変えずに、蛇腹管内の空気速度・方向と計測器への空気取り入れ速度・方向を同じにする等速吸引(isokinetic sampling)を行う必要がある。観測時には、計測時の対空飛行速度を一定(80ノット)とし、それに応じたセスナ機のエアスクープの開口幅とする必要がある。しかし、そこから入った空気は曲がりくねった蛇腹管を通り、種々の速度損失があると考えられるが、管内の空気速度をモニターしていないので、等速吸引の要件を満たしていない可能性もある。これは今後、確認と必要に応じた改善が必要である。

(4)は、80ノットでの航跡を記録するため、またDustMateの最小測定間隔に合せ、1秒間隔の記録を基本とする。高速での飛行を考慮し、我々は 0.1 秒間隔まで計測可能なカーレーシング用のGPSロガーを用い、できる限り1秒間隔の計測をした。

(5)は、先述のとおり 0.01mg 精度で計測可能な機器を用いた。フィルターの質量計測は何回か行い、計測誤差を把握するのが望ましい。質量 300mg 弱の同一のフィルターの複数回の計測では、おおよそプラスマイナス 0.05mg 程度の偏差が認められた。フィルターは湿度の影響を受けない仕様なので、この偏差は計測環境の影響と考えられる。

Table 1 Summary of airborne measurements of ash concentration until May 2014

Flight			DustMate measurement						Time of explosive eruption
No.	Date	Max Altitude (m)	from	to	duration (min:sec)	model	interval	mode	
01	2013/1/15	1800	10:00:54	10:59:54	0:59	UI	6 sec	µg	8:33, 9:50
02	2013/1/16	1900	12:27:37	12:57:18	0:29	UI	6 sec	µg	none
03	2013/1/18	1200	9:20:30	10:52:48	1:32	UI	6 sec	µg	none
04	2013/7/27	1500	14:25:39	15:19:54	0:54	DPRI	1 sec	µg	14:55 (not explosive)
05	2013/11/9	1300	12:40:49	14:40:21	1:59	DPRI	1 sec	µg	none
	2013/11/9		12:41:31	13:45:49	1:04	UI	1 sec	mg	
06	2013/11/11	1900	10:24:44	11:39:21	1:14	DPRI	1 sec	µg	none
	2013/11/11		10:22:30	11:39:28	1:16	UI	1 sec	mg	
07	2013/11/11	2600	14:22:32	16:50:47	2:28	DPRI	1 sec	µg	15:43
	2013/11/11		14:24:19	16:50:47	2:26	UI	1 sec	mg	
08	2014/5/13	1800	16:09:41	17:39:35	1:29	DPRI	3 sec	µg	none
	2014/5/13		16:10:28	17:38:37	1:28	UI	3 sec	µg	
09	2014/5/16	1800	15:12:55	15:53:10	0:40	DPRI	3 sec	µg	none

UI: DustMate owned by University of Iceland, DPRI: DustMate owned by DPRI

さらに、飛行地域の土地に不案内な場合、GPS付きタブレット端末で地図アプリを使うと、飛行機の現在位置を地図上で確認でき便利である。

GPSデータと濃度データは、まず、表計算用のシートで1秒間隔の時系列データとして整理した。GPSデータは、フリーソフトウェア‘nmea2kml’を用いて、時刻、緯度、経度、高度をcsvフォーマットで出力し、これにDustMateで観測された火山灰濃度データを加えて、観測結果データセットを作成できる。DustMateで記録される時刻がGPS時刻と相当ずれることがあるので、計測開始時にずれを記録し、データ整理時に補正すると共に、複数の計測器を用いた場合、濃度ピーク発生時刻が合致するかの確認が必要である。濃度データは、ガウスフィルターにより平準化した上で、各種作図をする。フリーソフトウェア‘GEGraph’によりGoogle Earth上に濃度計測結果を表示し、地図上で濃度変化を視覚的に確認することができる。以降に示すGoogle Earth上の濃度は、欧州の航空規制濃度区分に合わせて、0-0.2mg/m³を水色、0.2-2mg/m³を緑色、2-4mg/m³を黄色、4mg/m³超を赤色で示した。なお、ウェブサービス‘Earth Point’により柔軟な作図が可能である。

5. 航空機観測結果

上記の方法で行った過去の航空機観測結果をTable 1に示す。現在まで、計9回の飛行観測を実施し、その内3回の爆発的かそれに近い噴火があり高濃度の火山灰を観測できた。第1回飛行の結果は安田ら(2013)に報告されている。以下、第4回、第7回飛行観測結果を報告する。



Photo 3 Puff of Sakurajima for Measurement #4. A dark-color cloud seen above the right-hand side slope of Mt. Sakurajima. This is an image of east-looking web camera located downtown Kagoshima (http://373news.com/_sakucap/).

5.1 第4回飛行観測結果

このときは桜島の山頂が薄い厚さの雲で覆われていたが、その上空の飛行は可能であり、その後の天気はすぐれない予報だったため、飛行したところ15:54頃に小規模の噴火があり、運よく噴煙を観測することができた。噴煙はPhoto 3のライブカメラ画像でも確認できる。なお、この観測ではインパクトフォルダーは用いなかった。

観測結果の高濃度観測部分をFig.3に示す。降下火山灰中の飛行直前の14:56に撮影したPhoto 4のとおり、噴煙から縞状に降下する火山灰が認められる。2つの高濃度ピーク観測は、この降下火山灰中を飛行したときの観測である。このときの観測の濃度を地図上に示した図がFig.4である。

Fig.4に観測された濃度を地図上に表した。垂水市上空の赤色の高濃度に観測された部分2カ所が、この火山灰降下観測箇所である。

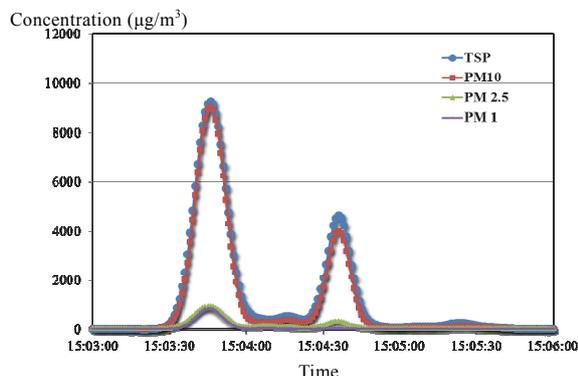


Fig. 3 Measured concentrations of ash fallout in Measurement #4 on July 27, 2013. Peaks occur at 15:03:46 and 15:04:36.

このときに、観測配信された国土交通省XRAIN桜島レーダ画像をFigs.5に示す。噴火時に火口付近で降雨強度5mm/h以下に相当するエコーが見られ、南東に流れる噴煙と考えられる1mm/h以下相当のエコーが見られる。このとき降雨はなかったため、火山灰からのエコーと考えられ、噴煙の位置の特定への利用が可能と考えられる。

このとき、パイロットは、噴煙中の飛行は不可だが、降下火山灰中は飛行可能と判断した。しかし、飛行中、Photo 5のとおり前面のシールドに火山灰が付着した。その後の飛行に支障はなかったが、これ以上の火山灰が付着し視程に影響がでるのは危険と判断されるため、我々はこの程度以上の降下火山灰が目視で確認できるとき飛行は今後行わないことにした。



Photo 4 Streak fallout of ash from puff in Measurement #4 viewed from airplane at 14:56. This fallout was measured.



Fig.4 Flight path and ash concentration measured by DustMate on July 27, 2013.



Photo 5 Front shield with ash deposit after flight through ash fallout.



Figs.5 MLIT's XRAIN Sakurajima X-band radar images at 15:06 (above) and 15:08 (bottom). Light blue color corresponds to 1.0mm/h or less rain, and dark blue color corresponds to 5.0mm/h or less rain. Each image is a composite of two scans done during the past 2 minutes of the indicated time.

5.2 第7回飛行観測結果

このときは、天候良好で、爆発的噴火が予測されたので、桜島上空を回遊しながら噴火を待った。爆発的噴火が15:43, 15:54, 16:35に発生した。噴煙は南東の風に流され、肝属川河口上空を通過した。観測は、連続噴煙の縁で行い、安全飛行可能な場合のみ降下火山灰中の飛行観測を行った。

DustMate 2台を用意し、ひとつミリグラムモードで、もう一つはマイクログラムモードで観測した。マイクログラムモード観測は観測値の飽和が多くみられるので、ミリグラムモードでの結果をFig.6に示す。これを地図上に示したのがFig.7である。噴煙の縁であっても最大で7mg/m³程度の非常に高い濃度が観測されたが、すぐ近くでは飛行に問題がないほど低濃度であることが分かる。

時々刻々変化する噴煙の位置をレーダで把握する

可能性を知るために、Figs.8にXRAIN桜島データを示した。桜島上空の噴煙は補足しているようだが、島外上空に達する噴煙のエコーは見られない。第4回飛行観測時は、火口から離れた場所であってもレーダエコーが認められたが、第7回飛行観測時はより大きな噴火にもかかわらずエコーは認められない。火山灰の粒径、水分含有等の諸条件が関係していると思われる。少なくとも、豪雨のモニター用のレーダ信号処理では、噴煙の位置を確実に知ることはできないと言える。噴煙の位置の把握は当初の想定よりはるかに難しい。また、噴煙の縁の観測から断面内の濃度推定も多くの課題があると言える。

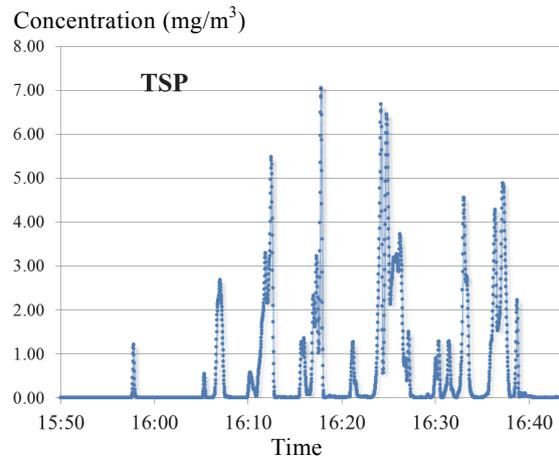


Fig.6 Total Suspended Particle concentration measured by DustMate on November 11, 2013.

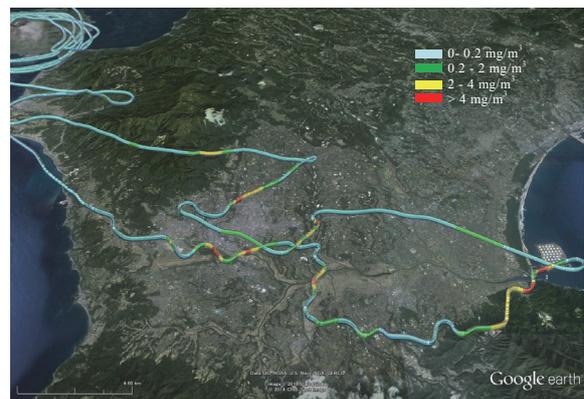
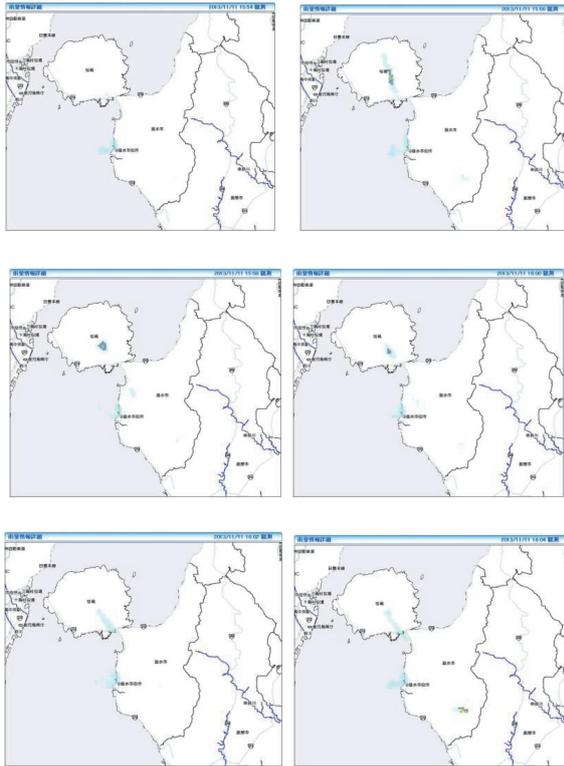


Fig.7 Flight path and ash concentration measured by DustMate on November 11, 2013.



Figs.8 MLIT's XRAIN Sakurajima X-band radar images at 15:54, 15:56, 15:58, 16:00, 16:02, and 16:04 from top left to bottom right. Light blue color corresponds to 1.0mm/h or less rain, and dark blue color corresponds to 5.0mm/h or less rain. Echo near the center of the figure is noise occurred at the location of radar station.

9. おわりに

火山灰の移流拡散予測、及び、継続研究中の航空機による浮遊火山灰濃度観測の展望と課題、航空機観測とデータ処理の方法を述べ、今まで行った7回の観測の内、高濃度の観測ができた新たな2例の観測結果をXバンドレーダ画像と比較の上で報告した。

観測値の妥当性は、観測方法の見直しと検証、及び他の粉塵計での観測値と比較する必要がある。また噴煙位置の正確な把握と、噴煙の縁部のみでの観測から断面の平均濃度の推定が可能かの判断もどこかで行う必要がある。

謝 辞

本稿の図表の作成にあたっては、インド工科大学からのインターン学生、Rahul GARG君、及び、博士課程、玉置哲也君の多大なる助けを得た。本研究の一部は、科学研究費2012年度採択課題「浮遊火山灰計測におけるエクスペンドマルチパラメータレーダの活用」を用いた。

参考文献

- 井口正人（2012）：桜島における火山灰放出量予測に関する研究，京都大学防災研究所年報，第55号B，pp.169-176.
- 田中博（2003）：リアルタイム火山灰追跡モデル（PUFF）を用いた予報実験。「環境リスクの評価と管理報告」，筑波大学環境科学研究科，pp.25-58.
- 真木雅之（2013）：気象レーダで検出可能な噴煙の最小反射強度について，東大地震研共同利用研究会「火山現象のダイナミクス・素過程研究」，2013年12月（東京）.
- 安田成夫・梶谷義雄・多々納裕一・小野寺三朗（2011）：アイスランドにおける火山噴火と航空関連の大混乱，京都大学防災研究所年報，第54号A，pp. 59-66.
- 安田成夫・梶谷義雄・國友優（2012）：XバンドMPレーダによる浮遊火山灰計測の試み，京都大学防災研究所年報，第55号B，pp.1-8.
- 安田成夫・梶谷義雄・國友 優・Jonas ELÍASSON・Andreas VOGEL・桃谷辰也（2013）：浮遊火山灰拡散モデルの検証に関わる現地計測，京都大学防災研究所年報，第56号B，pp.1-10.
- Elíasson, J. (2013)：アイスランド火山噴火災害に関する講演会（京都大学東京オフィス，平成25年11月27日），（http://ppdr.dpri.kyoto-u.ac.jp/file/13.11.27_eliasson.pdf）
- Onodera, S. (2013): A Study on the Prevention of Aircraft Encounter with Volcanic As in Proximity Area Between Airways and Active Volcano, Ph.D dissertation to the University of Tsukuba, 272 pp.

（論文受理日：2014年6月11日）