

## 浮遊火山灰拡散モデルの検証に関わる現地計測

### In-situ Measurement Concerning the Verification of an Air-borne Volcanic Ash Diffusion Model

安田成夫・梶谷義雄・國友 優<sup>(1)</sup>・Jonas ELIASSON<sup>(2)</sup>・Andreas VOGEL<sup>(3)</sup>

桃谷辰也<sup>(4)</sup>

Nario YASUDA, Yoshio KAJITANI, Masaru KUNITOMO<sup>(1)</sup>, Jonas ELIASSON<sup>(2)</sup>, Andreas VOGEL<sup>(3)</sup>  
and Tatsuya MOMOTANI<sup>(4)</sup>

(1) 国土交通省九州地方整備局

(2) アイスランド国アイスランド大学地震工学センター

(3) ドイツ国応用科学デュッセルドルフ大学

(4) 一般財団法人 日本気象協会

(1) Kyusyu Regional Bureau, MLIT

(2) University of Iceland, Iceland

(3) University of Applied Science Dusseldorf, Germany

(4) Japan Weather Agency

#### Synopsis

It is clear that no-fly zone of the airplane during a volcanic eruption has the great influence on the economic activity of the area, based on the 2010 eruptions of Eyjafjallajökull in Iceland. When existence of volcanic ash clouds is estimated as a result of prediction calculation, it becomes impossible to fly the airspace. However, during the volcanic eruption of Iceland, European aviation authorities took the measure which loosens no-fly zone of an airplane according to the concentration of volcanic ash in order to avoid confusion of an air route at an early stage. In that case, the diffusion of volcanic ash clouds grasps viewing or a satellite photograph, and the concentration of volcanic ash is measured by LIDAR (detection by a laser picture) and the dust meter in the light airplane.

This research firstly aims at grasping the three-dimensional structure of volcanic ash plume by the in-situ airborne ash measurement. The atmospheric diffusion model which predicts the volcanic ash concentration is verified by the comparison between observed and calculated values. The in-situ field is Mt. Sakurajima in Kagoshima where the eruption frequency is high.

By the X band MP radar which the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism installed in Tarumizu City, the distribution and shade of the air-borne volcanic ashes by the eruption of Sakurajima was measured. However, the physical evaluation of the measurement value was considered to be needed, and the possibility of the practical

usage of X band MP radar was also investigated.

**キーワード**：航空路火山灰，現地計測，XバンドMPレーダ

**Key words**; Aviation volcanic ash, field monitoring, X-band MP radar

## 1. まえがき

浮遊火山灰に対する民間航空機の安全な飛行を確保するために、航空路火山灰情報が提供されている。わが国の場合、火山灰情報は、国内の気象庁のほか、海外やパイロットレポート、さらには衛星による火山灰雲の監視を情報源として、可視・赤外・差分画像による検知を行っている。それらの情報に基づいて、航空路火山灰拡散モデルを用いて予報間隔 6 時間毎に 18 時間先の予報を行っている。最終的にテキストと図情報というかたちで、周辺に火山雲が検知されている間、実況と予測が発表される(新堀・桜井, 2010)。



Fig. 1 Flight over the L Reykjavik

ところで、2010 年のアイスランド Eyjafjallajokull の噴火時には、ロンドン VAAC から発表された航空路火山灰情報に基づいてヨーロッパ上空の飛行禁止区域が設定された。広範囲に飛行制限区域が設定されたためにフライトのキャンセルが相次ぎ、大きな経済的損失を招いてしまった。英国議会では、航空路火山灰情報による飛行制限区域の範囲が、過大に設定されていないかとの指摘があり、公聴会が開かれるほどであった(安田ら, 2011)。当時の対応としては、浮遊火山灰濃度に応じて飛行制限区域を設ける方向へ展開した。一方、アイスランドでは、実際に浮遊している火山灰濃度を計測するために、Fig. 1 に示すようにセスナ機に計測機器を搭載して首都レ



Fig. 2 Plume tracking measurement: May 11th tracking of the Eyjafjallajokull plume.

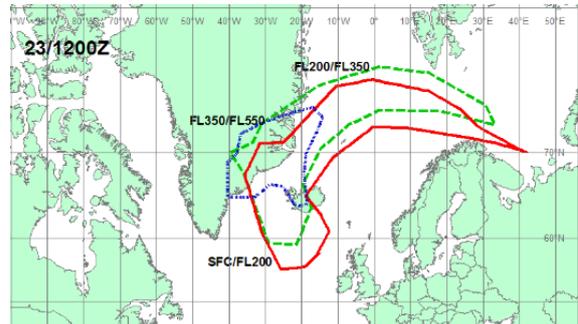
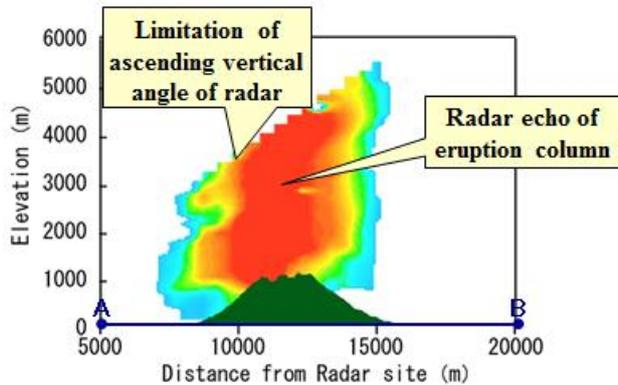


Fig. 3 Ash prediction of May 23rd 2011 from VAAC London; Plume is not visible from IMO (Iceland Meteorological Office) in Reykjavik but haziness seen in the eastern sky.

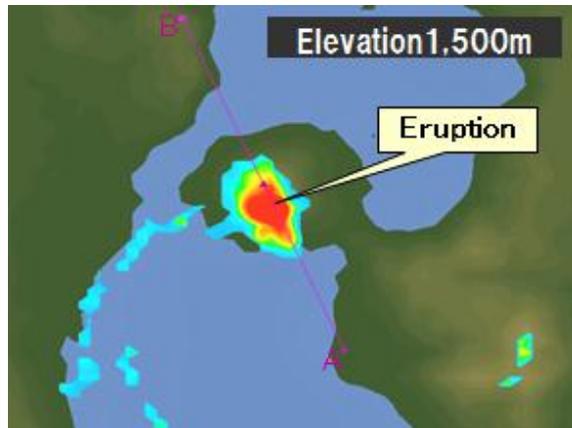
イキャビク上空、あるいは Fig. 2 に示すように噴火口から噴出した浮遊火山灰周辺を飛行した(Eliasson, 2010)。さらに、2011 年 5 月 23 日のアイスランド、Grimsvotn が噴火した際には、早ければ 24 日にイギリス、26 日にはフランス、スペインに到達すると予想された。しかしながら、英国気象庁による Fig. 3 が示すように、2010 年に採用された飛行制限の緩和措置により、火山灰の影響範囲がかなり縮小されることとなった。筆者らの二人は、Grimsvotn が噴火した際においても、セスナ機によって浮遊火山灰濃度の計測を実施した(Eliasson, et al., 2011; Weber, et al.,

2012). 計測値は速やかに欧州大陸を拠点とする航空会社に伝達され、航空機の飛行の安全に貢献している。

今回、筆者らの二人がアイスランドで実施した浮遊火山灰の計測手法を、桜島噴火に伴う浮遊火山灰の濃度計測に試みた。同時に、浮遊火山灰の濃度を計測している時刻に、XバンドMPレーダによる三次元 (CAPPI; Constant Altitude Plan Position Indicator) 観測データが得られている。さらに、南日本新聞社が桜島をビデオにより定点観測しているが、セサナ機による計測時刻の画像も得られている。併せて、過年度に継続して、無人飛行機を活用した浮遊火山灰濃度あるいはその粒度分布特性の計測を実施したのでここに報告するものである。



(a) Section of CAPPI on July 24, 2012



(b) Plan of CAPPI on July 24, 2012

Fig. 4 Height of eruption column was not observed due to the limitation of ascending vertical angle of X-band MP Radar.

## 2. XバンドMPレーダによる桜島噴煙柱の計測

安田ら(2012)は、XバンドMPレーダ(以下、Xバンドレーダ)による火山灰計測の可能性について示した。2012年7月24日19時頃、桜島南岳で大規模な火山噴火があり、Xバンドレーダにより Fig. 4 に示すCAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator)



Photo 1 View of Sakurajima eruption from Miyazaki City (80km from Sakurajima) on July 24, 2012: <http://www.youtube.com/watch?v=DmTGjwwHkik>

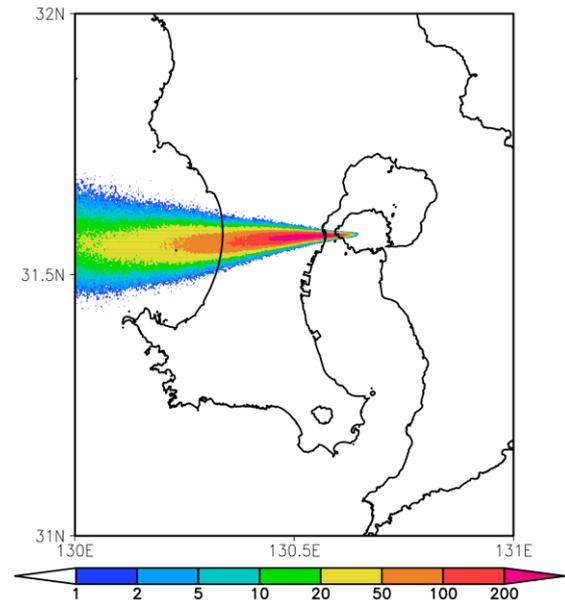


Fig. 5 Distribution of volcanic plume at 15:00 of July 25, 2012 by diffusion model

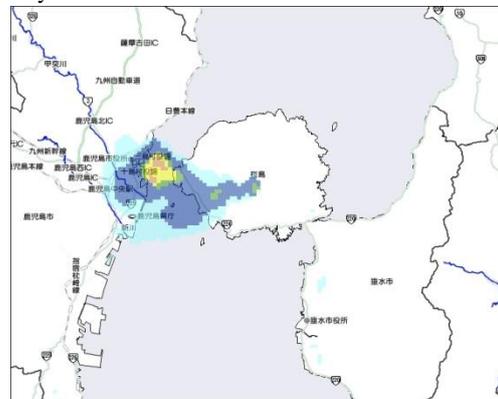


Fig. 6 Distribution of volcanic plume at 19:46 of July 24, 2012 by X Band MP Radar

が得られている。(a)に示す断面図は X バンドレーダの設定上最上部のまでは計測されていないものの、標高 1,500m 付近について(b)に示す平面図が得られている。東京 VAAC の発表によれば噴煙柱の高度は海拔 5,400m に達している。火山噴火が大規模であったため、桜島直近からは噴煙の様子が把握しきれなかった。実際の噴煙柱を桜島から遠くはなれた宮崎市からのものを Photo 1 に示す。写真映像によれば X バンドレーダによる CAPPI は実際の噴煙柱の外形をほぼ再現していることが理解される。(b)の平面図は 2 分間隔で浮遊火山灰の移動を追跡することが可能であり、今回噴煙は桜島の西に位置する鹿児島市内方向へと流れた。Fig. 5 は火山灰拡散モデルによって、当日の浮遊火山灰の移動を計算により再現した平面図である。計算結果は、翌日 25 日午後 3 時である。X バンドレーダによって計測された火山灰の分布はレーダの計測範囲の制限により 24 日 19:46 以降トレースができていない。

### 3. 無人飛行機 (UAV) による計測

過年度に引き続き、無人飛行機(UAV; Unmanned Aerial Vehicle) (安田ら, 2012) による浮遊火山灰濃度計測の予備試験を実施した。今回は、過年度に製作した浮遊火山灰採取のための器具とデジタル粉塵計を同一の格納器内に設置し、同時に浮遊火山灰濃度と火山灰の粒径分布を計測した。

#### 3.1 使用した計測機器

観測に使用したデジタル粉塵計(光散乱式)を Photo 2 に示す。デジタル粉塵計は、Photo 3 に示すフィルタフォルダ(速水ら, 2006)とともに Photo 4 に示す球形の格納器に搭載した(安田ら, 2012)。フィルタフォルダは、空気力学の原理によって浮遊している微量微粒子を分級する。本器は、毎分 5000 cc の吸引能力を有する真空ポンプをチューブで繋ぎ、浮遊火山灰をフィルタ内に吸引する。フィルタ内には毎分 5000 cc の吸引時に粒子径  $2.5\mu\text{m}$ 、 $10.0\mu\text{m}$  を分級するインパクトがセットされており、分級され



Photo 2 Digital dust meter



Photo 3 Air-pump and filter folder; Air-pump has 5000cc/min. of maximum suction capacity.



Photo 4 Digital dust meter, filter folder inside wind shelter and small video camera; Wind shelter is attached in the front of UAV



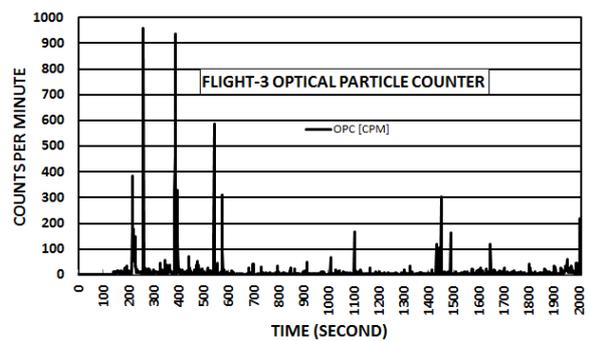
Photo 5 Adsorbed ash on the donuts type filter (Outer diameter;  $\phi 47\text{mm}$ )

た火山灰粒子は、円盤型フィルタ(外径 47 mm)あるいは Photo 5 に示すようにドーナツ型フィルタ(外径 47 mm)に吸着される。フィルタは予め重量を電子天秤で計測しておき、火山灰吸着後のフィルタを再度計測することにより、火山灰の重量を求めた。また、一連の作業では、フィルタはジップロック付の

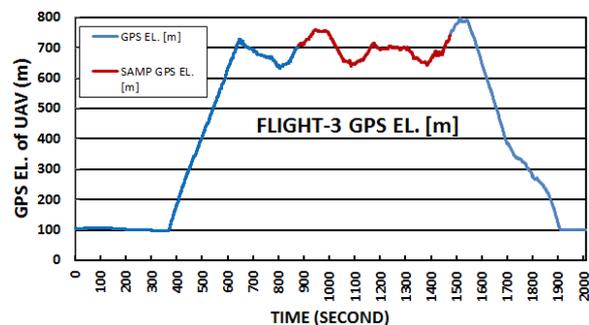
ポリ袋に入れた状態で計測しておく。このようにして、計測中に吸着された火山灰の飛散を防いだ。UAVは、一旦離陸すると最大3時間程度飛行するため、デジタル粉塵計は離陸直前に計測を開始し、フィルタフォルダに接続するポンプは、内蔵のタイマーによって火山灰採取を開始・終了させた。

### 3.2 予備試験および試験結果

国土交通省大隅河川国道事務所が砂防工事を実施している黒神地区を UAV の離陸着場として、予備試験を実施した。黒神地区は桜島の東方に位置し、浮遊火山灰が東方向に棚引く日時に使用することとした。今回の飛行最高高度は 1000m とした。フィルタフォルダに接続したポンプの吸引のタイミング、あるいはデジタル粉塵計による計測値について UAV の離陸から着陸までの変化を把握することを目的と



(a) Digital dust meter



(b) Elevation of UAV by GPS

Fig. 7 Counts per minutes of digital dust mater and flight elevation of UAV. (b); Legend of SAMP GPS EL. shows air-borne ash sampling of 10 minutes by filter folder.

している。Fig. 7 にデジタル粉塵計による計測値と GPS による UAV の飛行高度を示す。デジタル粉塵計の値は、離陸時に高い値を示しており、地表付近に舞っている粉塵が計測されていると考えられる。一方、高度 800m 付近で計測値が下がっているが、2～3 地点で大きな値を示しており、浮遊火山灰を補足したと考えられる。Fig. 7(b)は、GPS による UAV 標高の経時変化を示す。図中の赤線は、標高 800m

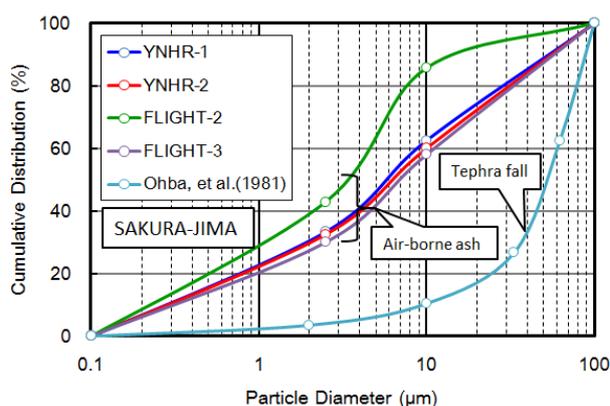


Fig. 8 Grain size distribution curve of volcanic ash in Sakurajima. YNHR-1,-2 are obtained at Yunohira Observatory. FLIGHT-2, 3 are observed by UAV. Tephra fall in Kagoshima City after Ohba, et al (1981) is arranged to compare the observed data.

付近でフィルタフォルダによって UAV 周辺の大気を採取していることを示している。この飛行では、浮遊火山灰の下辺りを通して、フィルタフォルダによって採取された浮遊火山灰の全重量とポンプが吸引した体積によって、採取時間における単位体積当たりの火山灰重量が求められる。その値とデジタル粉塵計によって求められたカウント値との関係を導き出すことによって、デジタル粉塵計を用いた火山灰の重量濃度を求めることができる。今回約 10 分間に採取された浮遊火山灰の重量から、同じ時刻の間に得られたデジタル粉塵計の値を求めたところ  $48\text{mg}/\text{m}^3$  と大きめの値であり、さらなる検討が必要である。

黒神川上空の浮遊火山灰並びに桜島の中腹の湯ノ平展望台駐車場の降下火山灰について、粒度分布曲線を Fig. 8 に示す。この図では、データを整理する都合上、火山灰の最大粒径、最少粒径をそれぞれ  $100.0\mu\text{m}$ ,  $0.1\mu\text{m}$  と設定している。火山灰粒径、 $2.5\mu\text{m}$ ,  $10.0\mu\text{m}$  はフィルタフォルダによって採取された値であり、円盤型フィルタで採取された重量を合わせた全重量の比から粒径加積率を求めている。FLIGHT-2, 3 は、UAV による粒度分布曲線であり  $10.0\mu\text{m}$  粒径以下の重量は 60～80% の範囲にある。一方、YNHR-1,2 は湯ノ平展望台駐車場ででの粒度分布曲線であり、計測では、駐車場に堆積した降下火山灰を一旦舞い上げさせたものを採取した。湯ノ平展望台での採取は、火山灰以外の粉塵の混入を避け、計測は観光客が途絶えた夕方に実施した。また、火山灰の強制的な舞い上げは、リモートコントロールの小型ヘリにより行った。 $10\mu\text{m}$  以下の粒径加積率は YNHR では、約 60% となっており FLIGHT に比較して細粒分が少な

くなっている。浮遊火山灰の細粒分は、沈降が遅れるために加積率が少なくなっていると考えられる。本図には参考のために、大庭ら(1981)が鹿児島市内に堆積した火山灰の粒径分布曲線を示している。実際には100 $\mu\text{m}$ 以上の粒径も採取されているが、最大粒径を100 $\mu\text{m}$ として整理したところ、FLIGHT, YNHRよりも細粒分がかなり少なくなっている。この違いは、大庭ら(1981)が計測した火山灰の原因となる噴火規模と、今回計測している火山灰の粒径分布を与える噴火規模が大きく異なっていることが考えられる。例えば、大規模噴火では噴煙柱が高高度に達するために、筆者らが検討している粒径の微細な浮遊火山灰はより遠くへ拡散するのではないか。いずれにしても、今回得られた浮遊火山灰の粒度分布曲線は火山灰拡散モデルの入力値にとって大いに参考になると思われる。

#### 4. セスナ機による現地計測

セスナ機に粉塵濃度計測装置を搭載して、桜島の浮遊火山灰濃度の計測を実施した。計測は直近に降雨がなく大気中の湿度が低く、雲が少ない晴天時の3日間に渡って実施した。計測時の気象条件として、湿度が高いと浮遊火山灰の周りに水分が吸着され正



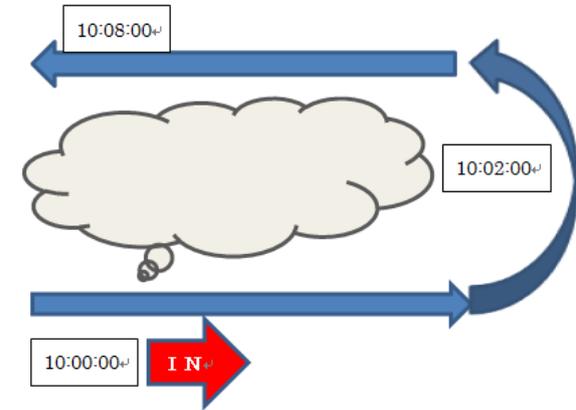
Photo 6 Dust meter: Total, PM10, PM2.5, PM1.0 particles are monitored. Brown tube from the dust meter is connected to the air vent of the plane.



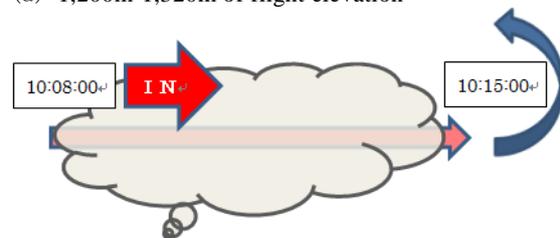
Photo 7 Portable aerosol spectrometer: The instrument gives real time particles in 31 different size channels.



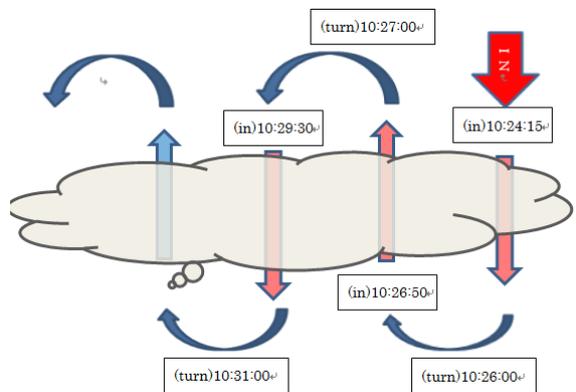
Photo 8 Cessna172 (Similar plane used)



(a) 1,200m-1,320m of flight elevation



(b) 1,000m of flight elevation



(c) 1,600m-1800m of flight elevation

Fig. 9 Puff tracks by Cessna (original plan): Above; Circumference of the puffs. Middle; Under the puffs. Below; Zigzag tracks inside the puffs.

確な値が計測されない。また、雲があると肉眼によって浮遊火山灰との識別が困難になることによる。

#### 4.1 使用した計測機器

計測に使用した火山灰濃度計測装置は、Dust meter

と Portable aerosol spectrometer (SkyOPC)で Photo 6 および Photo 7 に示す。 Dust meter は、装置内に取り込んだ火山灰粒子にレーザ光を照射し、レーザ光を遮る火山灰粒子の個数をカウントすることにより濃度を計測する。本装置は粒子径 1.0 $\mu\text{m}$  以下、2.5 $\mu\text{m}$  以下、10.0 $\mu\text{m}$  以下および全量の濃度を、6 秒間隔で表示する。 SkyOpc は、 Dust meter と同様の機能を有するが、31 チャンネルを有し、31 の粒子径について濃度を計測することが可能となっている。計測装置は、Photo 8 に示すセスナ機、Cessna172 に搭載した。空中に浮遊する火山灰は、Photo 6 に示すようにセスナ機の空気取り入れ口 (Vent) からコックピット内に蛇腹管を介して取り入れる。蛇腹管に計測装置の外気取り入れ口 (Inlet) を接続する。蛇腹管の内腔断面積は、Vent の開口面積の約 4 倍となっており、計測装置内に火山灰を安定して取り込める構造となっている (Pena et al., 1977)。セスナ機の対空飛行速度は、浮遊火山灰粒子を機体内へ誘導する際に破碎しないように 80 ノット (時速 148 km) に制限した。セスナ機による計測時には、GPS(Global Positioning System)を搭載しているので飛行機の地理的な位置をリアルタイムあるいは記録されたデータにより後日確認できるようになっている。そのため、浮遊火山灰濃度が計測された地理的位置も特定することが可能である。また、GPS には時刻も記録されるので、セスナ機の飛行状況と X バンドレーダによる火山灰の浮遊状況についても比較することが可能となっている。

#### 4.2 計測手順

京大桜島火山活動研究センター及び鹿児島気象台からの桜島噴火情報に基づいて、セスナ機の離陸を判断した。計測は、1月15日、17日、18日の3日間



Photo 9 Puffs of Sakurajima at 8:00 on Jan. 15, 2013: Video slide from 373news.com by Minami Japan Newspaper Co. ([www.373news.com/sakucap/](http://www.373news.com/sakucap/))

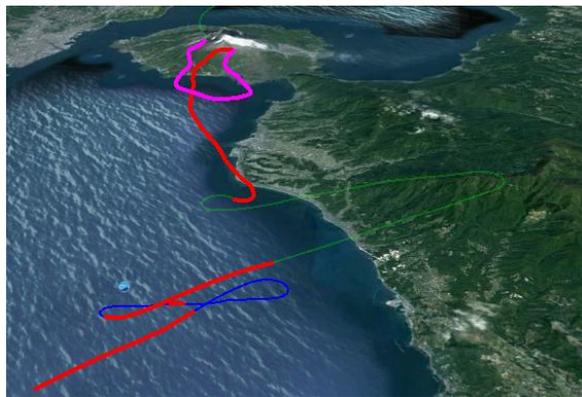


Photo10 Puffs tracks of Sakurajima (Direction of South) on Jan. 15 2013 by Google earth.

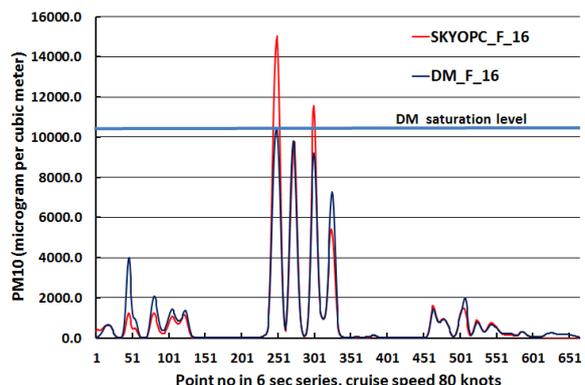
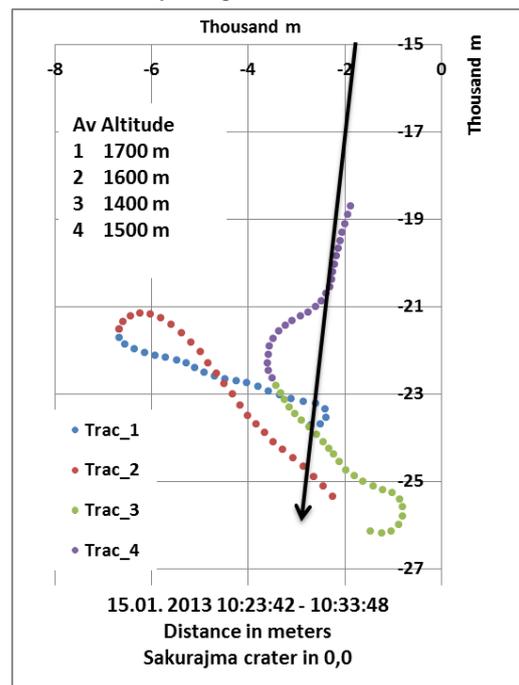


Fig. 10 Measured puffs on Jan. 15, 2013.: Above: Puff tracks, starting in point no 221 (blue) and ending in 354 (violet), 25 points in each track, black arrow is the  $r_p$  vector from the crater. Black circles, centers of puff 1 and 2. Below: Measured concentrations, filtered 16 times, puff numbers shown.

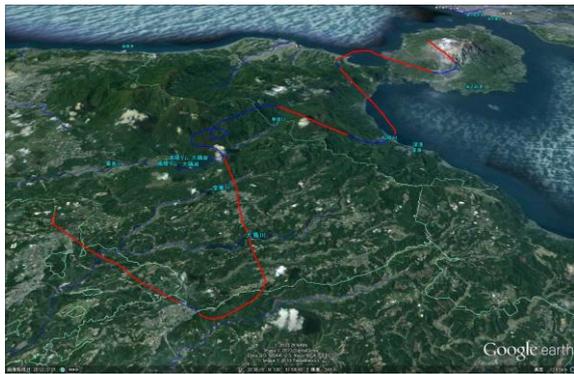


Photo11 Puffs tracks of Sakurajima (Direction of East) on Jan. 16 2013 by Google earth.

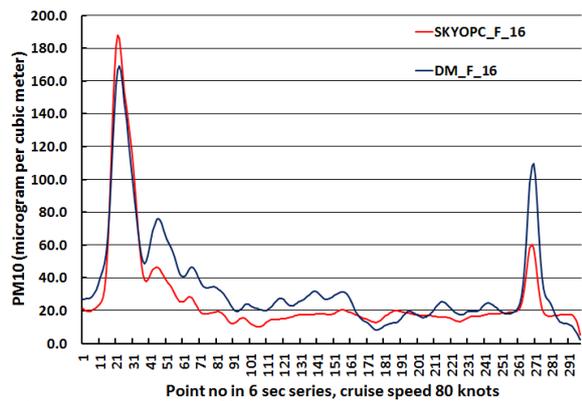


Fig. 11 Measured puffs on Jan. 16. 2013.

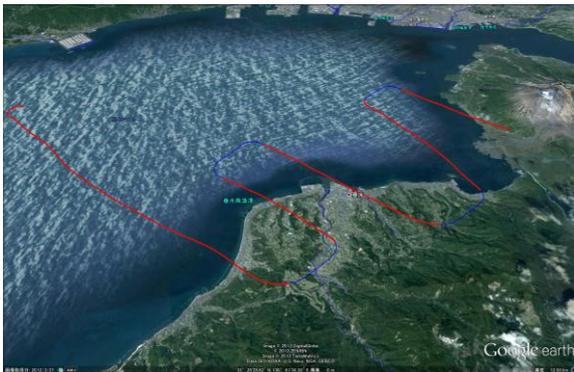


Photo12 Puffs tracks of Sakurajima (Direction of South) on Jan. 18 2013 by Google earth.

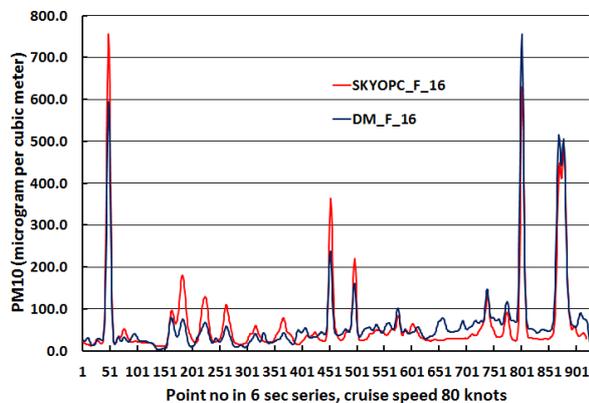


Fig. 12 Measured puffs on Jan. 18. 2013.

実施した。噴火後の浮遊火山灰は3日間とも北西の風に乗る、垂水市方面へ流れた。セスナ機は、桜島周辺に到着すると浮遊火山灰の流れる方向を確認するとともに、浮遊火山灰の影響を受けていない空域で大気の濃度計測を行い、バックグラウンド値を確認した。次に、浮遊火山灰の周辺を飛行することによって浮遊火山灰の境界付近の火山灰濃度を得ることができる。また、浮遊火山灰が風に乗って流れる方向に向かってジグザグに飛行することによって、浮遊火山灰濃度の二次元的な分布を把握することとした。今回使用したセスナ機のエンジンはジェットエンジンではなく、レシプロエンジンなので、浮遊火山灰を吸引しても性能に及ぼす影響が極めて少ない。そのため、気象条件によりセスナ機が浮遊火山灰の中に取り込まれても飛行の安全性に支障をきたすことはない。

### 4.3 ビデオカメラによる定点観測

鹿児島市内に設置したビデオカメラによって桜島の噴煙を上げる様子が、一分間隔毎のスライドとして見る事ができる(南日本新聞)。セスナ機による観測を行った1月15日、16日、18日の午前中は、天候は晴れであり、現地計測時刻における桜島の噴煙をスライドにて確認することができる。Photo 9は、1月15日午前8時の噴火の様子である。

### 4.4 計測結果

セスナ機による桜島周辺の飛行経路を Fig. 9 に示す。(a)の図は、浮遊火山灰の側面を火山灰の高度に合わせて飛行し、(b)の図は、一旦桜島方面へ戻ったのち、浮遊火山灰の下部を飛行した。さらに、桜島から離れたところで、浮遊火山灰の平面的な火山灰濃度を把握するための飛行経路を(c)に示す。Dust meter と SkyOpc の計測結果を Fig. 10 に示す。図は飛行の経過に伴う浮遊火山灰の濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) の変化を示している。飛行経路全体は、Google earth 上で Photo 10 に示す。また、ジグザグ飛行の平面的位置を Fig. 10 上段に示す。二種類の計測機器による値は、ガウスフィルタによって平滑化されている。ただし、計測値は両計器による値を比較するために、PM10 (粒子径  $10\mu\text{m}$ ) 以下の火山灰量で表している。計測値は、6秒間隔なので、時速80ノットとして247m飛行する毎に計測値が得られている。二つの計測機器による値の最大値は異なるものの、ピーク値が現れる時刻は、ほぼ一致している。両者の相関係数を算出したところ97%となっている。また、Dust meter は、濃度  $10,000\mu\text{g}/\text{m}^3$  が計測限界になっているため、SkyOpc を用いた計測値で火山灰濃度を議論するこ

とする。

浮遊火山灰が視認できる濃度は、Eliasson et al.(2011)によれば 2000-3000 (2-3mg/m<sup>3</sup>) であり、それよりも濃度が薄いと浮遊火山灰の境界が明瞭とはならない。セスナ機による現地計測時の時間管理表と Fig. 10 によれば、浮遊火山灰の周辺を飛行した 0 から 126 カウント値は 4mg/m<sup>3</sup>以下であり、浮遊火山灰の縁辺を飛行したと考えられる。今回の火山灰の比重は、2.6g/cm<sup>3</sup>として火山灰濃度をもとめている。火山灰の比重は、セスナ機エンジンの空気取入口に設置してあるフィルタに付着したものを採取して計量した。因みに浮遊火山灰濃度 4 mg/m<sup>3</sup>は、欧州における旅客機の飛行緩和措置では全面飛行禁止となる値である。

1月16日と18日に実施した計測結果を Figs. 11, 12 に示す。また、両日の Google earth 上における飛行経路の一部を Photos 11,12 に示す。1月15日の計測結果に比べて濃度が極端に小さめになっている。両日とも桜島が噴火してのち、浮遊火山灰が流れに伴って計測を実施している。視覚的には浮遊火山灰の存在を認識していたつもりであったが、実際には火山灰粒子が15日に比べて少なかったことが Figs. 11, 12 の結果になったと考えられる。

SAKURAJIMA PHM0 2013/01/15 10:00 EL= 6.0deg

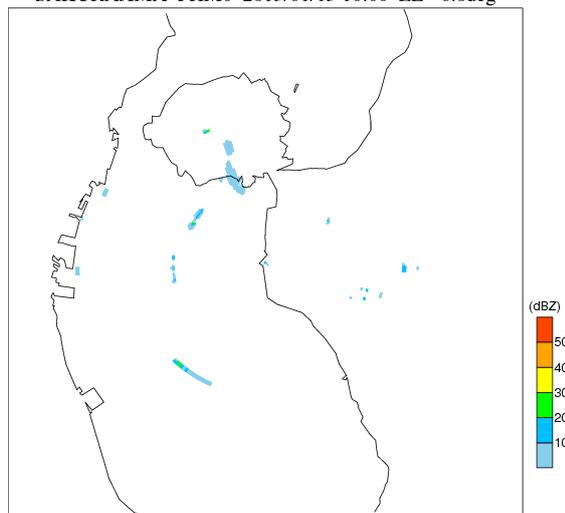


Fig. 13 Plan of puffs at 10:00 on Jan. 15 2013 by X-Band MP Radar

#### 4.5 XバンドMPレーダによる計測

セスナ機による現地計測時に、XバンドMPレーダによって得られた浮遊火山灰のCAPPI平面図を Fig. 13 に示す。本図は1月15日9:50AMに桜島が噴火した後の10:00AMの浮遊火山灰の様子である。筆者らが、セスナ機によって現地を飛行した時の印象に比べて浮遊火山灰の分布の範囲が狭いように感じる。これは、図に示した平面図は標高1,500mについ

て整理しているの、噴煙の高さが低い場合小さめに計測されたと考えられる。今後は、Xバンドレーダによって計測される浮遊火山灰の分布と、火山灰拡散モデルによる計算との比較を行うこととしている。

#### 5. おわりに

平成24年7月の桜島南岳の噴火について、XバンドMPレーダによって計測された浮遊火山灰の移動と火山灰拡散モデルによるシミュレーション結果は、ほぼ同様な傾向を示すことが確認された。

また、UAVによる浮遊火山灰の粒度分布曲線についても、2.5μmおよび10μmに着目すると一定の傾向があることが明らかとなった。

さらに、セスナ機によってDust meterを用いて浮遊火山灰の濃度の計測を試みたところ、火山噴出物の特性にもよるが、10mg/m<sup>3</sup>の火山灰の濃度が計測されることが分かった。

火山灰シミュレーションあるいはセスナ機による火山灰濃度の現地計測は、研究の緒に就いたばかりであり、桜島噴火のタイミングを見計らってデータの蓄積を図る予定である。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費・平成24年度挑戦的萌芽研究(24651188)(代表：安田成夫)及び、平成23・24年度、京都大学防災研究所・一般共同研究「火山灰噴出量・拡散予測と国際人流・物流解析手法の統合による火山リスク評価モデルの構築」の研究資金の一部を使用している。

#### 参考文献

- 大庭 昇, 山本温彦, 富田克利, 大迫暢光, 井ノ上幸造, 中村俊文(1981): 1979~1980年噴出火山灰の構成物質, 性状および生成メカニズム, 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学), No.14, pp.1-19, 1981
- 新堀敏基, 桜井利幸(2010):火山灰の輸送シミュレーションと航空路火山灰情報, 研究集会「火山現象の数値計算研究会」, 2010. 9
- 速水 洋・中座里美ほか(2006).化学分析用粒子サンプリングにおけるNILUフィルタフォルダ用プリセパレータの分粒性能の野外試験, Journal of Aerosol Research, 21(1), PP.67-71.
- 南日本新聞: [www.373news.com/sakucap/](http://www.373news.com/sakucap/) 桜島ライブ

- カメラ  
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, 京都大学防災研究年報, 第55号B, pp.1-8, 2012, 6
- Eliasson, J. (2010): Airborne measurements of the volcanic ash in the plume from Eyjafjallajökull in Keilir e Atlantic conference on Eyjafjallajökull and aviation. Reykjavik, Iceland.
- Eliasson, J. Weber, K., Vogel, A. (2011): Airborne measurements of dust pollution over airports in Keflavik, Reykjavik and vicinity during the Grimsvotn eruption May 2011 at the request of ISAVIA Air Navigation Service Provider of Iceland, Earthquake Engineering Research Centre, University of Iceland, Austurvegur 2a, 800 Selfoss, Research Report 11007, Nov 9 2011. (Technical report)
- Pena, J.A., Norman, J.M. and Thomson, D.W. (1977): Isokinetic Sampler for Continuous Airborne Aerosol Measurement, Journal of the Air Pollution Control Association, Vol. 27, No.4, pp.337-341, April 1977
- K. Weber, J. Eliasson, A. Vogel, C. Fischer, T. Pohl, G. van Haren, M. Meier, B. Grobéty and D. Dahmann (2012): Airborne in-situ investigations of the Eyjafjallajökull volcanic ash plume on Iceland and over north-western Germany with light aircrafts and optical particle counters, Atmospheric Environment 48. pp. 9-21, 2012
- Weber, K., Vogel, A., Fischer, C., Pohl, T., Eliasson, J. Yasuda, N. (2013): Airborne in-situ measurements with light aircraft – examples of research flights during Eruptions of Eyjafjallajökull, Etna, Grímsvötn, Sakurajima and quality assurance aspects, Volcanic Ash Strategic-initiative Team Workshop Dublin, Ireland, 5. March 2013.
- Yasuda, N and Kajitani Y. (2012): Development of volcanic risk assessment method based on the integration of ash distribution model and international commodity flow model, Cities on Volcanoes 2012, Colima, Mexico, 19. November, 2012

(論文受理日 : 2013年6月11日)