

## XバンドMPレーダによる浮遊火山灰計測の試み

安田成夫・梶谷義雄・國友 優<sup>(1)</sup>

(1) 国土交通省九州地方建設局大隅河川国道事務所

### 要 旨

火山の噴火に伴う航空機の飛行規制が、地域の経済活動に多大になる影響を及ぼすことは、2010年4月に噴火したアイスランドのEyjafjallajökull山の経過を見れば明らかである。大気中に浮遊する航空路火山灰の分布予測の結果、その存在が認められる場合、その空域を飛行することは不可能となる。アイスランドの火山噴火では、航空路の混乱を早期に収束するために火山灰濃度に応じて飛行を緩和する措置を講じた。その際、航空路火山灰の分布は目視あるいは衛星写真、火山灰濃度は軽飛行機に搭載したLIDAR（レーザ画像による検出）により把握している。

本研究では、火山灰の分布予測の初期値となる（1）噴煙柱並びに航空路火山灰の三次元的構造を把握すること、（2）航空路火山灰の濃度を火山灰拡散モデルによって予測することを目指している。研究フィールドは、噴火頻度が高い鹿児島県桜島としている。最終的に噴煙柱並びに航空路火山灰の計測ではXバンドMPレーダの活用を目指している。

**キーワード：** 航空路火山灰、民間航空、XバンドMPレーダ

### 1. はじめに

降雨観測を目的とした気象レーダとして、従来Cバンドレーダが用いられている。一般に気象情報を提供する気象庁のほかにも、豪雨の監視や河川を管理するため国土交通省においても独自に40台余りを設置している。近年、降雨観測を目的とした気象レーダによる火山灰の計測が国内外の研究者により実施されている(Rose et al., 1995; 真木, 2002; Marzano et al., 2006)。Lacasse(2004)は、アイスランドのHekla山の噴火事例を用いて、Cバンドレーダが航空路火山灰の計測に利用できないかを検討している。しかしながら、Cバンドレーダは計測範囲が半径200 kmと長い、遠方では地表付近の計測ができず、計測頻度が5分間に1度であるのと、氷・雪・雨の分離が難しく、計測の精度に難点がある。一方、Xバンドレーダは、使用する波長が3cmとCバンドレーダの5cmよりも短く、測定精度がCバンドレーダよりも高いが、降雨減衰のため計測範囲が極めて短い。MPレーダ（マルチパラメータレーダ）の開発により高精度の降雨量推定が可能となってきた。今回使用するXバンドMPレーダは、桜島の噴火による降下火山灰が降雨

によって土石流化することを監視するため精度の高い降雨観測を目的としている。XバンドMPレーダは、雨粒の形状がその大きさによって異なることを利用して降雨量を推定しているため、形状が変化しない雪・霰・氷の計測は研究途上にある。同様に火山灰についても固形状であるため計測については先例がないものの、計測が可能となれば全国展開が図られているXバンドMPレーダの用途がさらに拡充すると、現在欧州で検討されているLIDARに比べて遥かに高い計測精度が期待される。

XバンドMPレーダが、垂水市に設置されたのち桜島の噴火活動も活発化しており、いくつかのデータが得られている。しかも、Cバンドレーダでは、雨の分離が困難とされているが(Lacasse,2004)、XバンドMPレーダによるデータを検討したところ分離が可能であることが明らかとなっている。次の段階としてXバンドMPレーダによる観測データと実際に浮遊している火山灰がどのような関係にあるかを明確にする必要がある。具体的には、何らかの方法によって火山灰の計測ならびに採取を空間座標の取得とともに実施し、レーダによる観測データとの比較を行うことによって、噴煙柱及び航空路火山灰の三次元的構造を明確にすることが可能となる。さらには、

実際の火山灰濃度とレーダによる観測データの関係も明確にすることができれば、浮遊火山灰の濃度についても広範囲にわたって三次元的に把握することが可能となる。Elfasson (2011)は、2011年5月にアイスランドのGrímsötn火山の噴火時において、複数のダストメータを搭載したセスナ機によって浮遊火山灰の濃度分布計測を試みている。計測する火山灰粒子径の分布によっては実際の値よりも小さな濃度が計測される懸念があり、計測手法に改善の余地があるものの、浮遊している火山灰の計測は技術的に可能と考えられる。

降下火山灰を予測計算する際に、初期条件としての噴煙柱の高さが重要になる。しかし、噴煙柱の高さは目視による観測に依存しているのが現状である。本研究によって、噴煙柱の三次元構造が昼夜を問わず計測することが可能となり、火山灰拡散予測精度の向上が期待される。さらには航空路火山灰の濃度を計測することにより適切な飛行区域の設定のための航空路火山灰情報 (VAAC) の提供が可能となる。以上のことより、本研究は、気象庁の火山灰情報提供といった行政活動、民間航空の安全性、空輸に係る産業の経済活動の維持といった総合防災 (Integrated Disaster Prevention) に係る実践的研究とも位置づけられるものである。

## 2. XバンドMPレーダによる計測

### 2.1 導入の経緯

国土交通省では、豪雨の監視や河川管理のためにCバンド波長の気象レーダを全国展開している。今回注目しているXバンドMPレーダは、Fig.1に示すように国土交通省大隅河川国道事務所が桜島における土石流対策のための降雨観測を目的として、2011年3月に桜島近傍の垂水国道維持出張所 (垂水市) に設置し、7月から試験運用を実施している。今回の試験運用期間を活用して、桜島の火山灰計測を試みることにした。XバンドMPレーダの計測用の仰角は、Fig.2に示すように1.7°と6.0°を設定している。

### 2.2 火山灰計測の試み

2011年6月1日から計測されたデータによりXバンドMPレーダの精度検証を実施している。XバンドMPレーダでは、レーダ反射強度の他に、レーダ反射因子差 (ZDR)、偏波間相関係数 ( $\rho_{HV}$ )、偏波間位相差 ( $\phi_{DP}$ )、偏波間位相差変化率 (KDP) といった偏波パラメータやドップラー速度 (V) データが得られる。火山灰計測の検証では、偏波パラメータの観測状況を解析し、レーダ観測値において火山灰と降雨とを分離するパラメータの同定を行うことも

に、火山灰の粒子形状を把握するための偏波パラメータの同定を行うことになる。

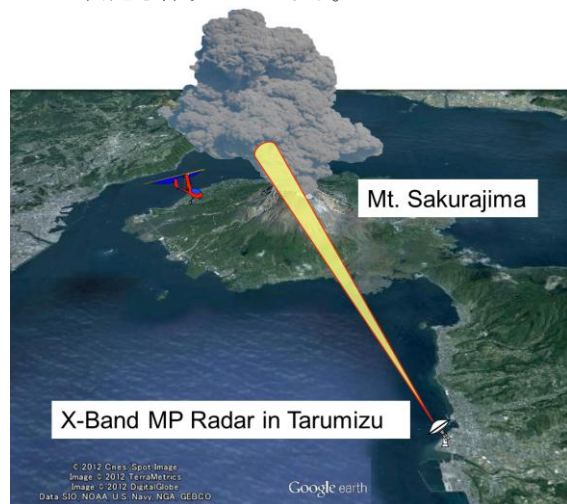


Fig. 1 Location of X-Band MP Radar installed in Tarumizu (Revised the Google Earth)

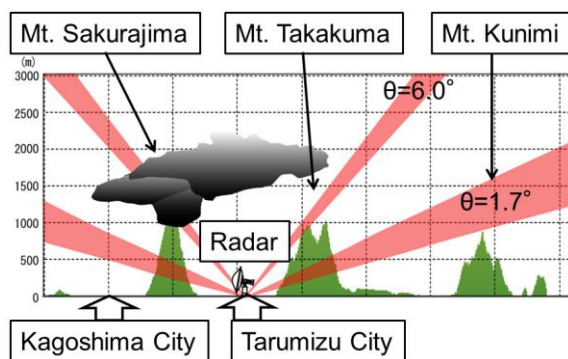


Fig. 2 Observation ascending vertical angle of X-band MP Radar

桜島火山を観測範囲に含む気象レーダとして、Fig.2に示すように桜島XバンドMPレーダ、国土交通省Cバンドレーダ、気象庁Cバンドレーダがある。XバンドMPレーダの試験運用開始以降の桜島火山の噴煙検知事例を整理している。桜島火山噴火時のレーダによる火山灰の観測特性の解析によれば、XバンドMPレーダは、Cバンドレーダよりも検知率は高い。

次に、XバンドMPレーダによる3次元 (CAPPI; Constant Altitude Plan Position Indicator) 観測データの活用による噴煙柱の特性解析を実施している。CAPPI観測により、桜島火山上空は5分に1度、上空4,800mまで観測が可能となっており、このデータを活用することで、噴煙柱の立体構造を把握することができる。CAPPI観測データと目視観測値あるいは衛星画像データ等とを比較検討することにより、噴煙柱の特性 (高さ、形状等) について解析を行う。

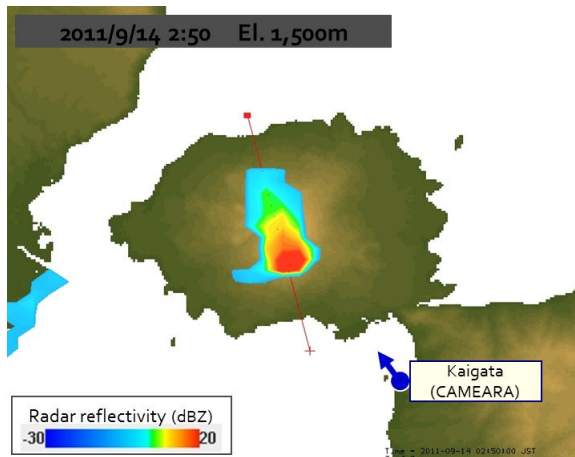


Fig. 3(a) Observed data by CAPPI, 14 Sep. 2011 (Plan)

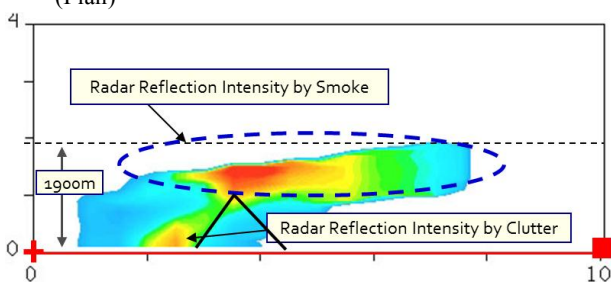


Fig. 3(b) Observed data by CAPPI, 14 Sep. 2011 (Cross Section)

XバンドMPレーダによる桜島火山上空のCAPPI観測状況は、Fig.3に示すとおりであり、2011年9月14日の噴火では、噴煙の高度が1,900mまで達していることがわかる。現段階では得られるパラメータが数種類存在し、降雨データと火山灰データとの分離を検討中である。最終的に、計測値が火山灰のどのような物理的特性を表現しているかを明確にすることを目指している。

### 3. 無人飛行機 (UAV) による火山灰計測

#### 3.1 無人飛行機 (UAV)



Photo 1 Flying unmaned aerial vehicle (UAV)

今回使用する無人飛行機 (UAV) は、動力はエンジンであり、Photo1に示すようにプロペラが機体の中央に据え付けられている。従来のようにプロペラが前面についていると着陸する際に、破損する可能性が高いのでこのような方式を採用している。その分制御が難しくなるが、計測機器等を機体前方に搭載することにより、エンジンの排気による影響が少ない。主翼は、ハンググライダーのような形状をしており、構造が単純であり、翼端が自由に動くので着陸時に破損しにくい。



Photo 2 Dust meter in the wind shelter



Photo 3 Wind shelter attached in front of the UAV

目的に応じた計測機器等は、機体の前方に格納できるようになっている。ペイロードは3kg程度である。今回搭載するデジタル粉塵計 (Photo2参照) は、電池の重量込みで1.3kgであり、浮遊火山灰採取のための計器も搭載可能である。Photo3は、UAVに計測計器を設置したところである。

軽量小型のGPSと粉塵計とを同期させることにより、火山灰の計測値とその計測位置を三次元的に表現することが可能である (Fig.4参照)。遠隔操作によって、計器の電源の断続が可能であり、火山灰を採

取する際に採取時間を遠隔で設定することが可能となる。

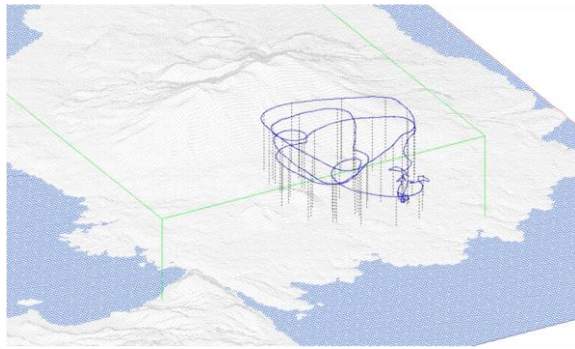


Fig. 4 Flight locus of UAV in Sakurajima by GPS, 24 February 2012

UAVの飛行最高高度は、鹿児島空港の航空管制との調整を行い、海拔1,500mである。民間旅客機や一般の航空機が飛行していない場合にUAV飛行中における航空管制との連携を密にすることを前提として飛行許可がおりる。

### 3.2 火山灰計測

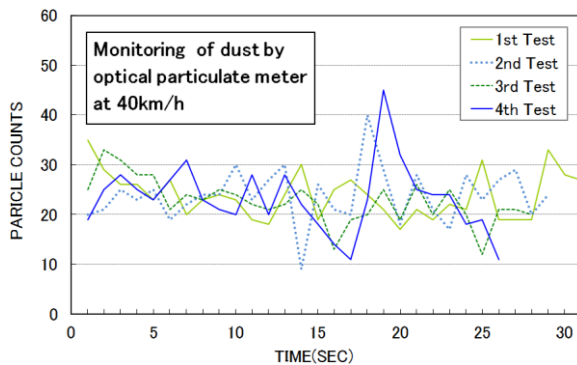


Fig. 5 Preliminary test of optical particulate meter (Run speed range of 40km/h)

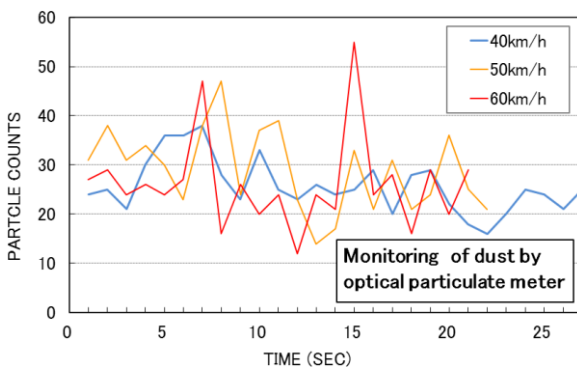


Fig. 6 Preliminary test of dust meter (Run speed range of 40 to 60km/hr)

XバンドMPレーダで得られるレーダ観測値から浮遊火山灰濃度や降灰量を得るためには、レーダで観

測値が得られ領域の浮遊火山灰濃度値 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) や降灰量 ( $\text{mm}/\text{m}^2$ ) の実測値が不可欠である。ここでは、火山灰濃度を計測するためにデジタル粉塵計を用いることとし、予め地上においてデジタル粉塵計の検証を行った。デジタル粉塵計は光散乱方式を採用しており、計器内に取り込んだ粉塵にレーザ光を照射し、粉塵による散乱光強度が質量濃度に比例することを利用して、大気中に浮遊する粉塵の質量濃度を計測するものである。したがって計測する粉塵の色調によって値が異なることになる。また、粉塵計はポンプによって粉塵を計器内に吸引する機構となっているので、時速40~60kmで移動するUAVに搭載して計測可能であることを確認する必要がある。実際には、Photo3に示すように、デジタル粉塵計を格納した状態で、自動車に搭載して数種類の速度で走行し計測値の比較を行った。Fig.5は、時速40kmで4回同じ地点を走行することによってデータの再現性を確認している。縦軸の計測値は一秒毎のカウント値であり、健康被害に係る粉塵はこの値の一分間の平均値として表現される。計測値は小さいものの一定の再現性が確保されていると考えられる。さらに、時速40~60kmで走行したときの計測値をFig.6に示す。計測値は20~40の範囲に分布しており、採取速度の影響は時速40~60kmの範囲では少ないと判断される。

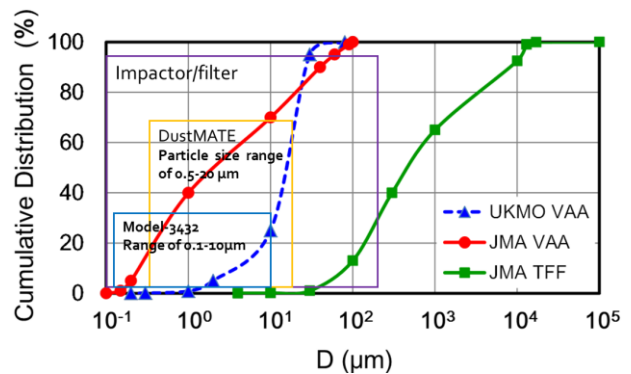


Fig.7 Component of the Eyjafjallajökull volcanic ash plume

Eyjafjallajökull山が噴火した際に、英国気象庁(UKMO)に設置されているLondon VAACが火山灰の拡散予測を行ったが、その際の火山灰の粒径加積曲線をFig.7に示す。図には、日本の気象庁(JMA)も拡散予測の検証を実施しており、その際の火山灰の粒径加積曲線を示している。今回用いるデジタル粉塵計の粒子計測範囲は、0.1~10.0 $\mu\text{m}$ である。一方、Elfasson, et al.(2011)が用いたDustMate (光散乱を利用するデジタル粉塵計とは計測手法が異なっており、粒子の数自体をレーザ光で直接数える方式。)の計測範囲は、0.5~20.0 $\mu\text{m}$ となっており、火山灰の粒径

全体が網羅できているわけではない。実際の火山灰の粒度分布は広い範囲を有しており、粒径の大きなものほど火口に近いところで降下する。図中のTFFは降下火山灰であり、浮遊火山灰であるVAAよりも大きな粒度組成を有している。したがって、粉塵計あるいはDustMateによる計測値は、計測する粒径範囲が狭いので実際の値よりも小さめになっている可能性がある。そこで、実際に浮遊している火山灰を採取することによって、単位体積当たりの重量密度と粒度分布を求める必要がある。火山灰を採取して求めた値と粉塵計等による値との関係を明確にすることになる。

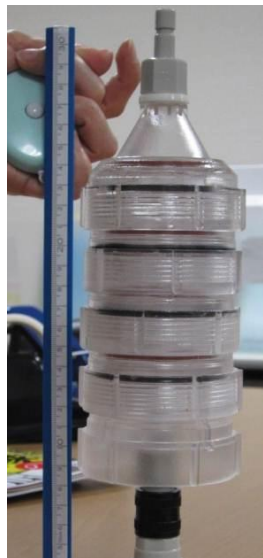


Photo 4 NILU Filter Folder with Impactor

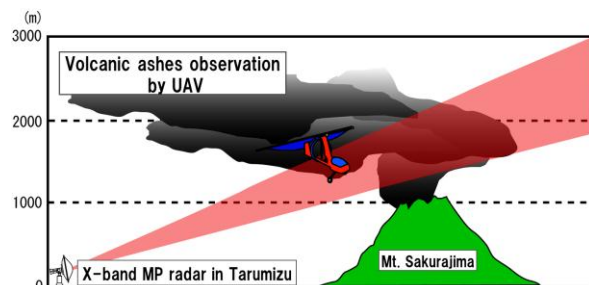


Fig. 8 Rader and ash measurement by UAV

Photo 4は、浮遊火山灰の採取に用いる器具を示す(速水ら,2006)。本器具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ものであり、粒子径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の重量と粒子径 $10.0\mu\text{m}$ 以上の重量を求めることが可能である。実際には、単位時間当たり一定の大気吸引(5L/分)が可能ポンプに接続することによって浮遊火山灰を器具内に導くことになる。

実際の火山灰計測では、桜島火山の噴火がある程度大規模であるときにFig.8に示すようにXバンドMPレーダによる計測に合わせて、無人飛行機を飛ばすことになる。

#### 4. 火山灰移流拡散モデル

##### 4.1 モデルの検証

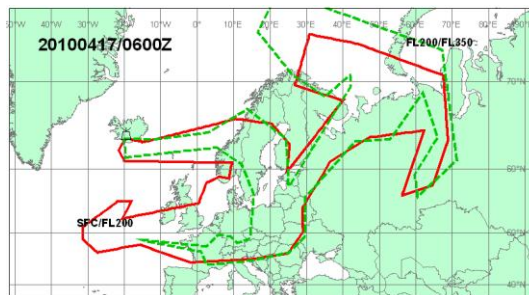


Fig. 9 Prediction of volcanic ash plume, 16 April 2010, 06UTC, SFC/FL200 and FL200/FL350, London VAAC

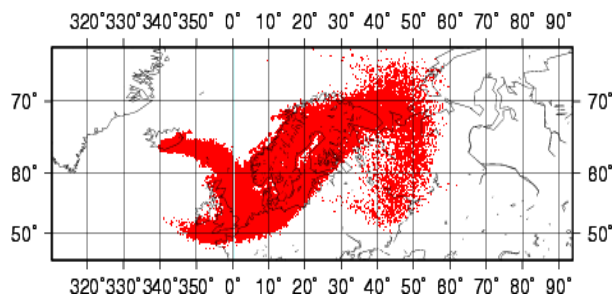


Fig. 10(a) Volcanic ash clouds, SFC/FL200

(Calculation)

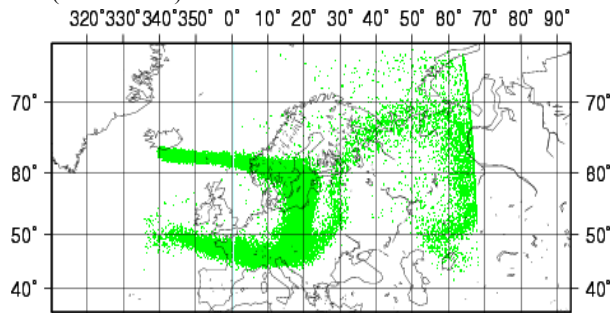


Fig. 10(b) Volcanic ash clouds, FL200/FL350

(Calculation)

火山灰の拡散予測を行う際に用いられる火山灰拡散モデルについて、Eyjafjallajökull山の2010年の噴火事例と桜島火山の2009年の噴火事例を用いて検証を行った。今回検証を行う拡散モデルは、将来日本国内及び近隣に位置する火山が大規模噴火を起こすとき、噴火による航空路火山灰の分布シナリオを想定する際に使用する予定である。さらには、XバンドMPレーダによって計測される桜島火山の航空路火山灰と拡散モデルによって予測される航空路火山灰の比較を行うことにより、相互の計測ならびに予測精度の向上を目指すこととしている。

航空路火山灰の拡散予測は、最初にWRF(Weather Research and Forecasting Model)を使用した気象モデルで大気の流れを計算する。併行して鈴木(1990)によ



による人・モノの往来も活発になってきており、このようなシナリオに対して飛行制限がかかった場合の経済的損失を把握し、併せて代替手段を検討しておくことは極めて重要である。

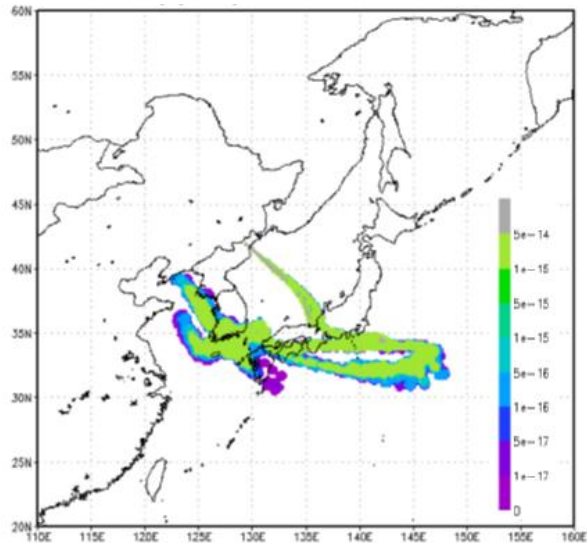


Fig. 13 Volcanic ash clouds by the eruption of Mt. Baekdu (Korea MA), April 3, 2009 SFC/FL200

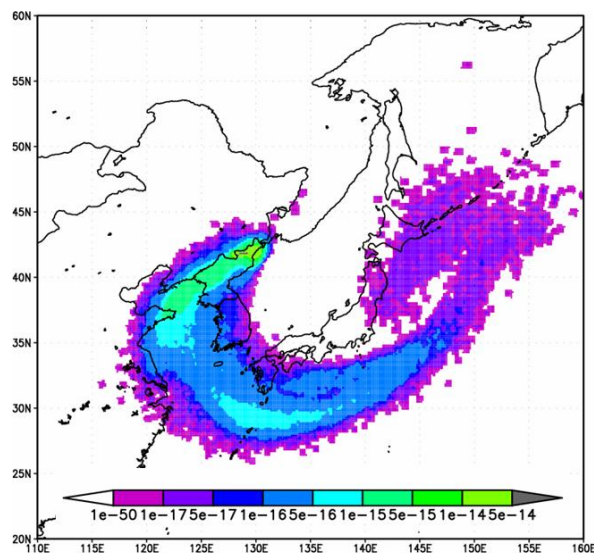


Fig. 14 Volcanic ash clouds by the eruption of Mt. Baekdu (Calculation), May 25, 2009 SFC/FL200

我が国は富士山、桜島火山をはじめとして47の火山が存在している火山国であり、日本以外に環太平洋火山帯に位置する東アジアの国々にも大規模火山が存在しており、今後いくつかの噴火シナリオに対して検討する必要がある。

## 5. おわりに

XバンドMPレーダにより微細な粒子が1分更新、250mメッシュで観測されれば、噴火時の噴煙高度や

移流・拡散状況が正確に把握できる。一方、降灰の定量的・面的な予測を実現するためには、適切な初期条件に基づいた拡散モデルを構築することが有用である。併せて、XバンドMPレーダの高性能な観測から得られる噴煙柱の高さや火山灰の流向の情報を拡散モデルの初期条件として最大限活用し、降灰予測手法の高精度化が大いに期待される。

さらに本研究成果は、気象庁が実施している火山灰情報提供といった行政活動、民間航空の安全性に係る航空管制部局の行政活動への適用を目指しており、今後実用性について関係行政当局と随時協議を実施する必要がある。

## 謝 辞

本研究は、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・物流分析手法の統合による火山リスク評価モデルの構築」の研究資金を一部使用している。

## 参考文献

- 鹿児島地方気象台(2009).桜島の火山活動解説資料(平成21年4月),平成21年4月.
- 韓国気象庁(2011): 火山灰予防及び軽減のための先制的火山対応総合対策.
- 久保信明(2007): 都市部移動体におけるGNSS 技術の測位精度と課題について, GPS/GNSS Symposium 2007.
- 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, 地震研共同利用研究集会, 火山現象の数値計算研究.
- 鈴木建夫(1990): 火山噴火時における降下火砕物災害の予測,職業訓練大学校紀要,19A,1-17.
- 真木雅之・岩波越 (2002): マルチパラメータレーダによる三宅島雄山の噴煙観測, 防災科学技術研究所研究資料,第266号.
- 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.
- 安田成夫・梶谷義雄・多々納裕 (2011): アイスランド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
- 聯合ニュース(2010): 白頭山に数年内噴火の兆候--気象庁が対策準備に着手—
- A.Jónas Elíasson (2010): Airborne measurements of the volcanic ash in the plume from Eyjafjallajökull May 2010, International Mini-Seminar on Icelandic

- Volcanic Eruption and Impacts on Aviation Systems: Hazard, Socio-Economic Impact, and Global Risk Governance, DPRI, Kyoto University.
- A. Jónas Elíasson (2011): Airborne measurements of dust pollution over airports in Keflavik, Reykjavik and vicinity during the Grimsvotn eruption May 2011. University of Iceland, Nov. 2011.
- C. Lacasse, S. Karlsdottir et al. (2004): Weather radar observations of the Hekla 2000 eruption cloud, Iceland, Bulletin of Volcano, No.55, pp.457-473.
- Frank Silvio Marzano et al. (2006): Volcanic Ash Cloud Retrieval by Ground-Based Microwave Weather Radar, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL.44. 11.
- K. Weber a, et al.(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, Elsevier, pp.9-21.
- Maki, M., Keenan, T., Sasaki, Y., and Nakamura, K.(2011):Characteristics of Raindrop Size Distribution in Tropical Continental Squall Lines Observed in Darwin, Australia, J. Appl. Meteor, 40, 1393–1412.
- Stephanie Mayer et al.(2010): Atmospheric profiling with the UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models, Meteorology and Atmospheric Physics, Springer, pp.1-12.
- William I. Rose et al. (1995): Real-Time C-Band Radar Observations of 1992 Eruption Clouds from Crater Peak, Mount Spurr Volcano, Alaska], THE 1992 ERUPTIONS OF CRATER PEAK VENT, MOUNT SPURR, ALASKA, U. S. Geol. Survey Bull 2139:19-28.

(論文受理日 : 2012年5月26日)

## The Trial of Measurement of the Volcanic Ash Clouds by X-Band MP Radar

Nario YASUDA, Yoshio KAJITANI and Masaru KUNITOMO<sup>(1)</sup>

(1) Ohsumi Office of River and Road, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

### 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) in the light airplane.

This research firstly aims at grasping the three-dimensional structure of eruption column and volcanic ash clouds. The eruption column is used as the initial value at the diffusion prediction of atmospheric volcanic ashes. Secondary, the research aims the concentration prediction of volcanic ashes by atmospheric diffusion model. The research field is Mt. Sakurajima in Kagoshima where the eruption frequency is high. Moreover, measurement of an eruption column and volcanic ash clouds aims at practical use of the X band MP radar.

**Keywords:** on-route volcanic ash, civil aviation, X-band MP radar