

火山噴火予知連絡会 火山活動評価検討会
報 告 書

—噴火現象の即時的な把握手法について—
【 概 要 】

平成 26 年 3 月
気象庁

1. はじめに

(1) 背景

爆発的噴火に伴って弾道を描いて飛散する「大きな噴石」は、周辺に直ちに被害を及ぼすため、その到達範囲を速やかに把握することが防災上重要である。

また、霧島山（新燃岳）の噴火では、風下の広い地域で、多量の火山灰に加え、風の影響を受ける「小さな噴石」が落下し被害が生じた。このような現象についても即時的な情報提供が求められている。

噴火現象は複雑であり、時間とともに様相が変化することから、噴火現象を地震マグニチュードのような単一の指標で即時的に評価することは困難である。しかし、噴火現象を即時的に把握して火山の噴火規模を迅速に定量的に評価することが可能になれば、その後の防災対応に有効である。

(2) 目的と検討事項

噴火開始後の早い段階で「大きな噴石」、「小さな噴石」の予測を行うこと等、噴火現象の即時的な把握のために、気象庁の火山監視業務での活用（既存の技術で対応可能な改善を含む）を念頭に、大学や気象庁以外の機関の研究成果等も踏まえて、以下の検討を行った。

- 1) 弾道を描いて飛散する大きな噴石の到達距離の予測手法
- 2) 風の影響を受ける小さな噴石の落下範囲の予測手法
- 3) 噴火規模を表す指標についての検討

なお、3) 項について、噴火規模に関係する物理量としては様々なものが考えられるが、本検討会では「噴煙の高さ」及び「火山灰総放出量」を指標として取り上げた。「噴煙の高さ」は量的降灰予測や小さな噴石の落下範囲の予測において必要であり、「火山灰総放出量」の把握は噴火活動の定量的な把握に有効であり、特に桜島では爆発的噴火以外でも火山灰を連続的に噴出する現象があることから重要である。

2. 弾道を描いて飛散する大きな噴石（大きな噴石）の到達距離の予測手法

(1) 予測手法

大きな噴石の最大到達距離は、噴石の最大射出速度の2乗 (V_{max}^2) に比例し、 V_{max}^2 は爆発の初期圧力にほぼ比例する。また、初期圧力は距離の-1乗で減衰しながら伝搬し、空振として観測されるとする。これらに基づき、桜島昭和火口の爆発的噴火について、観測された空振振幅から大きな噴石の最大到達距離を予測する手法を検討した。

○最大射出速度と最大到達距離の関係

カメラ映像に基づいて射出速度が射出角に依存することを検証し、最大射出

速度（火口直上方向への射出速度） V_{max} と最大到達距離 D_m の関係を示した。

○ V_{max}^2 と空振振幅の関係

観測された V_{max}^2 と空振振幅の関係式を求めた。その際、代表的な距離（5km）で期待される空振振幅 P_n を複数の観測点の空振振幅から求めた。

○桜島昭和火口の予測式

以上の手順により桜島昭和火口の爆発的噴火について調査し、距離 5km の空振振幅 P_n (Pa)から最大到達距離 D_m (m)を予測する関係が得られた。

$$D_m \approx 44 P_n$$

（ただし、昭和火口の爆発の 208 事例のうち 2 例は、実際の到達距離がこの予測式の距離を明らかに上回っていた。）

（2）過去の噴火事例への適用

上記の予測式が、他の爆発的噴火事例についてどの程度有効であるのかを調べるため、桜島南岳、新燃岳、浅間山、阿蘇山、十勝岳の事例を用いた。

過去の事例では、空振計による観測はないが、アネロイド型自記気圧計の気圧変化が記録されている場合がある。桜島において空振計との並行観測を行うことでアネロイド型自記気圧計の記録の有効性を確認し、このような過去事例も活用した。

これらから、桜島昭和火口で求められた予測式は、他の噴火事例でも D_m が 1500m を超える場合には概ね有効であることを確認した。

（3）課題

桜島昭和火口の爆発をもとに予測式を求めたが、桜島南岳の山頂噴火や桜島以外の火山の過去の爆発（浅間山や新燃岳等）における空振と到達距離の関係の分布も、この最大到達距離の予測範囲内におさまることがわかった（図 1）。

しかし予測に用いている式はあくまでも経験式であるため、本来は火山毎に作成されるべきものである。ただし、桜島以外の火山では予測式を求めるためのデータの蓄積がないため、当面は本検討で求められた予測式を適用することになる。新たな観測事例が得られた場合、速やかにパラメータを修正し、火山毎に精緻な予測式を作成していくことが重要である。

空振振幅に対し到達距離は 4~4.5km 程度で頭打ちとなる傾向がみられる。過去の浅間山の爆発では到達距離に比べ空振振幅が大きく観測されている事例がある。ある程度以上の規模の爆発では噴石を射出するメカニズムが異なっていたり、噴石の射出角が直上方向に近い角度に限られていたりすることも考えら

れ、検討が必要である。

また、本予測手法によって、落下する大きな噴石との時間的な猶予がどのくらいあるかを検討することも重要である。

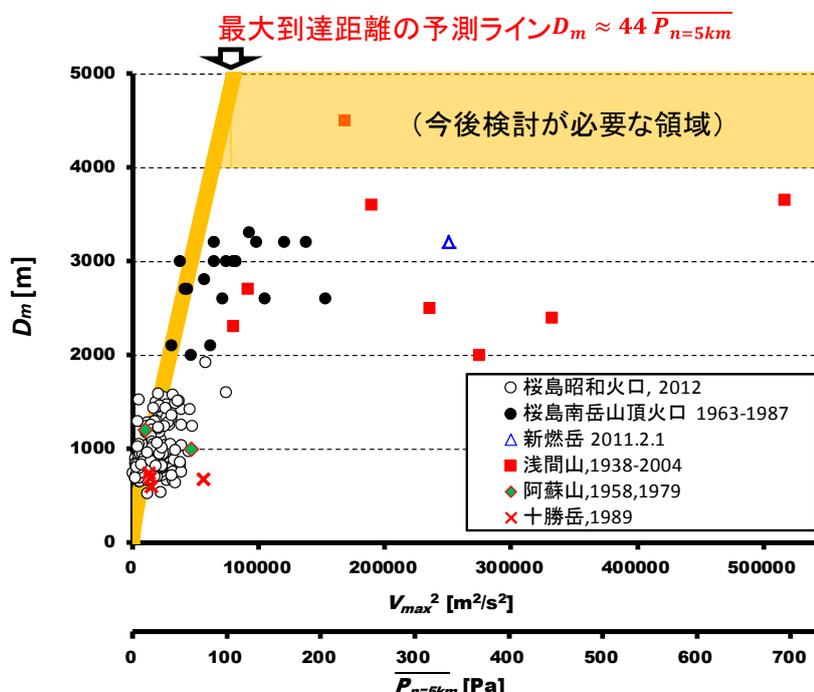


図 1 火口から 5km の位置に規格化した空振振幅 $P_{n=5km}$ と、大きな噴石の最大到達距離 D_m の関係。最大到達距離の上限ラインは、火口から 5km の距離に規格化した空振振幅 (Pa) に 44 を乗じた距離 (m) にほぼ等しい。

3. 風の影響を受ける小さな噴石（小さな噴石）の落下範囲の予測手法

(1) 予測手法と検討事項

大きさ数 10 mm の小さな噴石（火山礫）の大気中での運動は、空気抵抗を無視できず終端速度で落下することから、移流拡散モデルにより予測を行う。移流拡散モデルは、降灰予報等で運用実績のある気象庁領域移流拡散モデル（JMA-RATM）を使用し、落下する火山灰の量と火山礫の径を同時に予測することとした。

RATM を用いて火山礫の落下範囲を予測するにあたり、落下速度に影響する

- ・ 火山礫の密度 ρ_{pm}
- ・ 火山礫の形状 F

の設定を検討した。モデル検証では、火山礫の観測値が最大長径によることから、仮定した形状を介して粒径から長径を求めることで観測との比較を行った¹。

¹ 本報告書では、一つの火山灰・礫に対してその慣性主軸の径を a, b, c ($a > b > c$) と表す

(2) 検証結果

現行の RATM では、火山礫の形状は $F=2/3$ 、密度は $\rho_{pm}=1000 \text{ kg/m}^3$ を想定している。しかし、2011 年新燃岳噴火では、 $F=1/3$ 、 $\rho_{pm}=2000 \text{ kg/m}^3$ という火山礫も観測された。そのため、形状や密度をこのような値に変えた場合の RATM による火山礫の落下予測実験を行った。

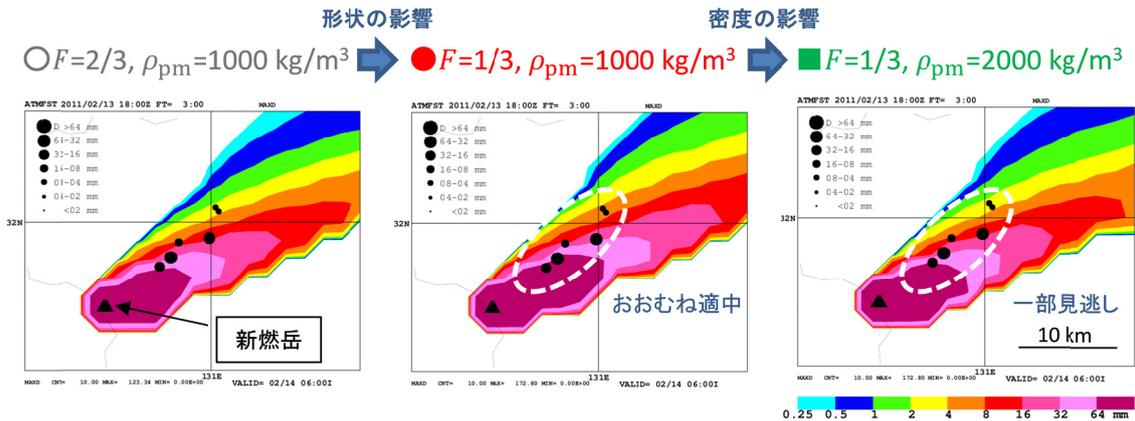


図 2 2011 年 2 月 14 日新燃岳噴火に伴う小さな噴石の形状 F および密度 ρ_{pm} を変えた JMA-RATM による予測結果（最大長径分布）。観測値（●印）は産業技術総合研究所、気象庁機動調査班による。初期値の噴煙柱モデルには風の影響が考慮されてないことに注意。

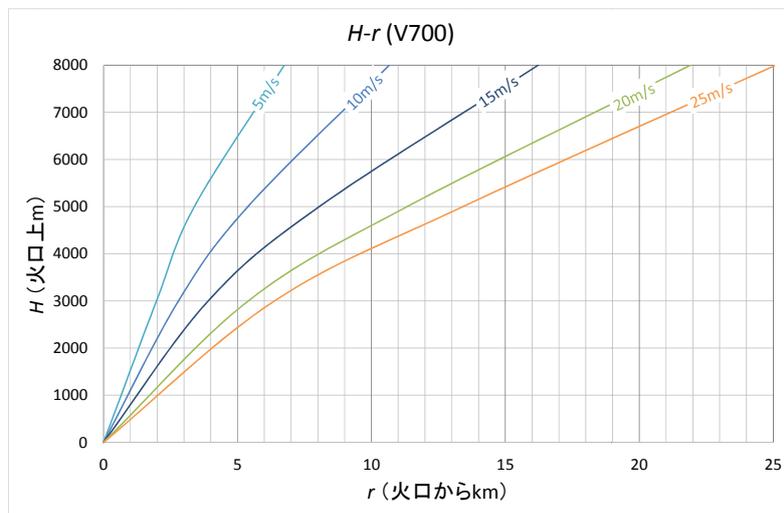


図 3 小さな噴石の最大到達距離チャート（試作版、統計期間：2013 年 9 月 5 日～2014 年 1 月 5 日）。縦軸は火口からの噴煙の高さ、横軸は火口から落下地点まで水平距離、図中の数値 (m/s) は 700 hPa 面風速を表す。小さな噴石は粒径 10 mm（長径 18 mm）、密度 1000 kg/m^3 、火口と落下地点の標高差は 800 m（桜島昭和火口）の場合。

とき、長軸の径 a を長径と呼び、形状は $F \equiv (b + c)/2a$ で定義する。粒径 D は 3 軸の平均 $(a + b + c)/3$ で定義されるので、長径は $a = 3D/(1 + 2F)$ と表される。複数の火山灰・礫の集合において、粒径あるいは長径の最大値をそれぞれ最大粒径、最大長径と呼ぶ。

その結果、落下範囲はおおむね予想できるが、形状に比べて密度の違いの方が同一粒径の予測範囲に与える影響が相対的に大きいこと、観測値をもとに形状および密度を設定しても見逃しが生じる事例があることが分かった（図2）。

また風の場合の違いによる、噴煙の高さと火山礫の到達距離の関係を予め把握するため、700 hPa 面（海拔約 3000 m）の風速と RATM による予測結果の統計を取り、小さな噴石の最大到達距離チャートを試作した（図3）。統計期間が短いため、1 ヶ年以上の観測と予測データ双方の蓄積を待つて精度を高める必要がある。

（3）課題

予測精度をさらに改善するためには、RATM の初期値に用いる噴煙柱モデルにおいて風の影響を考慮することが必要であり、今後の主な課題である。想定する火山礫の密度や形状については、桜島での試験運用などを通して検証を進める必要がある。また、防災情報として利用するためには、一般的に観測される値に合わせて最大長径による分布表現の検討が必要である。

4. 噴煙の高さの推定手法の検討

（1）噴煙の高さを即時的に把握する必要性

以下のような理由から噴煙の高さを即時的に把握する必要性があり、空振、地震、傾斜データを用いた噴煙の高さの推定手法を検討した。

- 噴火規模と関係する指標として、噴煙の高さを即時的に把握することは重要。
- 風の影響を受ける小さな噴石の到達範囲を予測するためには、噴石が最も遠くまで到達する場合の落下開始地点となる、噴煙の頂部の高さを知ることが必要。
- 天候等に依存する監視カメラやレーダーにはよらない噴煙の高さの推定手法が必要。

（2）推定手法と適用

空振、地震、傾斜データを処理し、噴煙の高さとの相関が最も高くなるようなべき乗関係を仮定して、適切なパラメータを求めることで、噴煙の高さと時間的推移を推定する手法を提案した。

具体的には、新燃岳 2011 年 1 月 26～27 日の連続的に噴煙をあげる噴火（連続噴火）について、気象レーダーで観測された噴煙の高さを参照することで、次のようなべき乗関係のパラメータを推定した。

空振データ：空振積分波形の自乗平均平方根（RMS）とのべき乗関係。

地震データ：地震変位波形の自乗平均平方根（RMS）とのべき乗関係。
傾斜データ：傾斜速度とのべき乗関係。

（3）結果と課題

2011年1月26～27日の新燃岳の連続噴火のうち、3～4km以上の安定した高さの噴煙については、空振計、地震計、傾斜計のデータより±2km程度の誤差で推定することが可能であった（図4）。

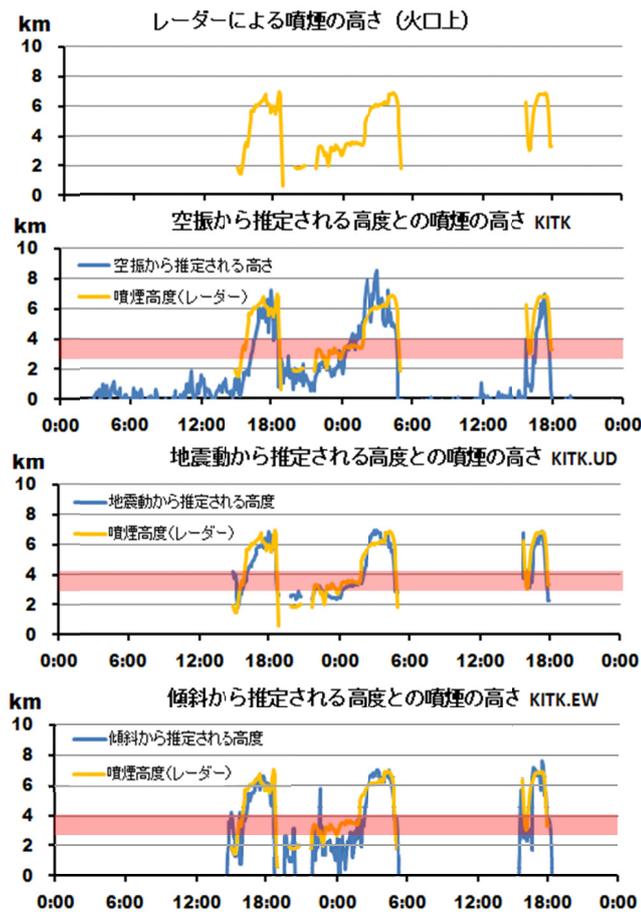


図4 空振、地震、傾斜データによる噴煙の高さの推定結果（新燃岳の連続噴火時、2011年1月26～27日）。ピンクの帯で示した3～4km以上の安定した高さの噴煙を概ね推定することが可能。

ただし、以下のような、更に検討を進めるべき項目が残されている。

- 他火山への適用の確認
- 安定的な噴煙と成長中の噴煙における適用の確認
- ノイズの除去方法
- 単発的に噴煙をあげる噴火に対する推定手法

5. 火山灰総放出量のモニタリング

本検討会では、噴火規模に関連する指標のひとつとして噴煙の高さの推定手法について検討を行ったが、噴煙の高さ以外の噴火規模の指標も重要である。そのひとつとして、噴煙の高さとも密接な関係のある火山灰総放出量が挙げられる。火山灰総放出量がモニタリングできれば、噴火活動の定量的把握に有効であるとともに、除灰活動等の情報提供にも貢献することが期待される。このため、火山灰総放出量の推定手法を検討することは重要な課題である。

桜島では、非爆発時の火山灰総放出量が、爆発に伴う火山灰総放出量と同等かそれ以上となっている場合がある。井口（2013）は桜島の噴火活動から、爆発はしていないが少しずつ連続して放出される火山灰量は地震動の振幅 2 乗和 (A) に、ブルカノ式噴火のような爆発時に放出される火山灰量は地盤変動から計算される体積収縮量 (V) に関係するとして、A と V にそれぞれ最適な係数を推定して火山灰総放出量を求める手法を提案した (図 5)。

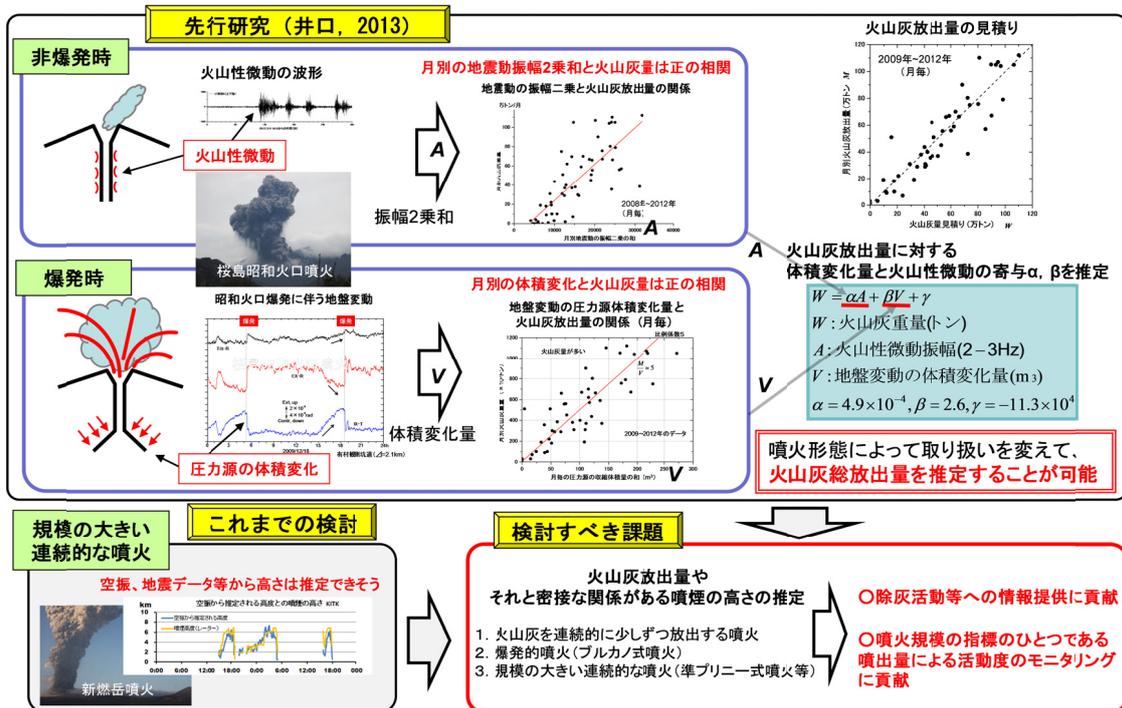


図 5 火山灰総放出量のモニタリング手法。噴煙の高さによる推定手法に加え、桜島の非爆発時（火山灰を少しずつ連続して放出）と爆発時（ブルカノ式噴火）の火山灰総放出量を地震動と地盤変動から推定する手法（井口，2013）でモニタリングすることが可能。

この手法は、現在の桜島の火山灰総放出量のモニタリングにも適用可能と考えられる。手法の検証を行ったところでは、これまでに1ヶ月程度の期間の火山灰総放出量の推定について有効性が確認されている。対象期間を短くした推定については今後検討を進める必要がある(図6)。

準プリニー式噴火のような規模の大きい連続的な噴火については、本検討会で検討した噴煙の高さの推定手法を用いることで噴出量の推定にある程度目処がついた。これと井口(2013)の手法をあわせて用いることで、噴火形態や噴火の継続時間の長短によらず、火山灰総放出量をモニタリングすることが可能になると考えられる。

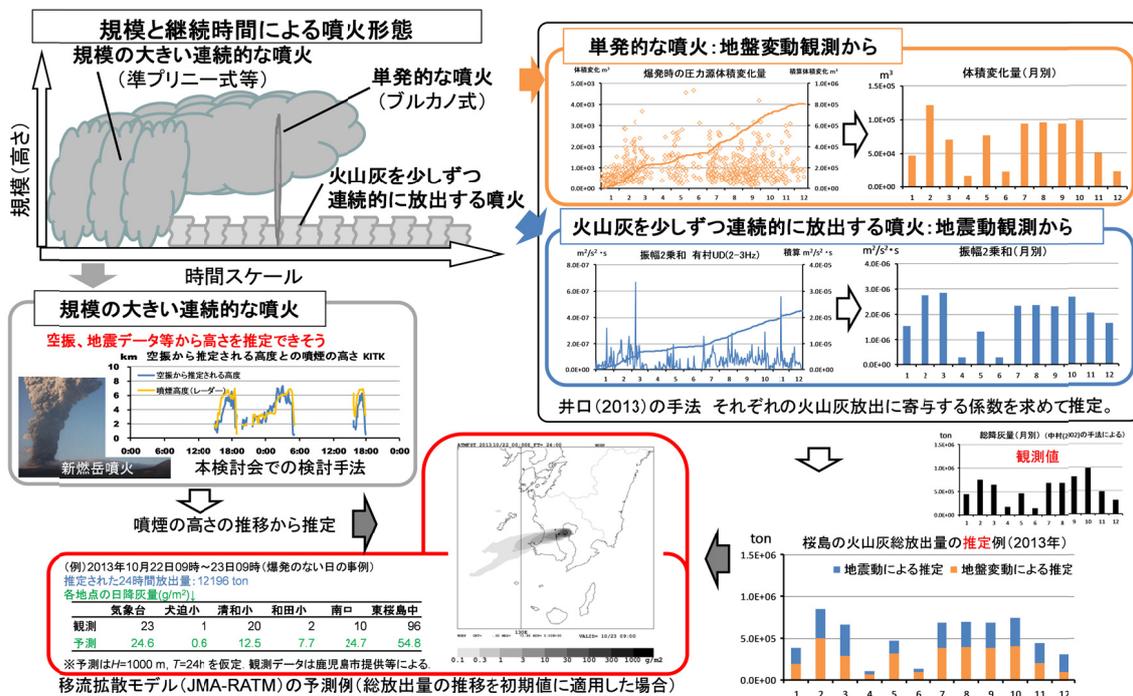


図6 火山灰総放出量のモニタリング。規模の大きい連続的な噴火の噴煙の高さによる推定に加え、爆発的噴火と火山灰を連続的に少しずつ放出する噴火に対する火山灰総噴出量の推定について試行。

6. 検討結果の活用と今後の課題

(1) 検討結果の活用

今回の検討結果は、次のように気象庁の火山監視業務への活用が期待される。

- ・ 大きな噴石の到達距離の予測手法

天候不良時に噴石の到達場所が目視等で確認できない場合の到達範囲の推定や防災機関等に注意喚起する爆発的噴火の判定基準、噴火警戒レベルの判定基準への反映。

- ・ 小さな噴石の落下範囲の予測手法

降灰予報の高度化に向けた提言に基づき、平成 26 年度末から運用開始を予定している量的降灰予報において、噴火前から提供する情報や噴火直後の速報への小さな噴石の降下範囲の情報を提供。

- ・ 噴煙の高さの推定手法

天候不良時に目視や気象レーダー、気象衛星等で噴煙の高さが観測できない場合の噴煙の高さの推定。噴煙の高さの情報は量的降灰予測や小さな噴石の落下範囲の予測にも不可欠な情報である。

- ・ 火山灰総放出量のモニタリング

噴火活動が活発な火山において、噴火時に即時的に火山灰総放出量に関する情報や量的降灰予測技術と組み合わせた降灰量の情報の提供。

(2) 今後の課題

大きな噴石の予測手法、小さな噴石の予測手法、噴煙の高さの推定手法及び火山灰総放出量のモニタリングのそれぞれに残された課題があり、手法をさらに高度化する検討を進める必要がある。

このほか、火砕流など重大な被害を及ぼす噴火現象の発生の即時的検知や規模推定などの重要な課題もあるが、これらは技術的解決されていない、また火山学的に検討を要する事柄もあることから将来的な課題とする。

引用文献

井口正人，2013：桜島昭和火口噴火の火山灰放出率のリアルタイムモニタリング．火山噴火予知連絡会第 16 回火山活動評価検討会資料，24pp.

中村政道，2002：桜島の総降灰量の推移．験震時報，65，135-143.