

## 噴火シナリオと確率論的予測

中田 節也\*

(2015年10月26日受付, 2016年1月5日受理)

### Eruption Scenarios and Probabilistic Forecasting

Setsuya NAKADA\*

Deterministic eruption scenarios may mislead taking countermeasures for coming hazards. Preparing the event tree covering all phenomena which may happen in future eruptions even with low probability for the volcano is important not only for forecasting eruptions but also for disaster prevention. Eruption event trees can be prepared in various concepts, for example, eruption type, scale, hazard type, impact direction or area and so on. The probability tree is the event tree equipped with probabilities for the branches. Probability trees by USGS and European scientists include the cumulative trees, trees based on scientists' elicitation and Bayesian trees. Introduction of the eruption event trees into the Japanese volcanologist community began around 2009. Then, event trees were prepared for Izu-Oshima, Miyakejima, Sakurajima, Usu, and Izu-Tobu volcanoes. Reasons for branching and time scales of events were also discussed and shown on the event trees together with probabilities. The event tree for Sinabung volcano, Indonesia, as an example of lava dome-forming eruptions was drawn in 2011, based on the geological study. On-going lava dome/flow eruption at this volcano just followed the most probable scenario. For Sakurajima volcano, a conceptual event tree was drawn for understanding the anomalies controlling the eruption scale.

**Key words:** event tree, probabilistic tree, conceptual event tree, eruption rate

#### 1. はじめに

火山噴火は極めて複雑な物理現象であり、火山ごとや、一つの火山でも噴火ごとに異なる現象を示す。噴火に共通した物理プロセスを完全に理解することは現在の科学では不可能である。しかし、噴火しそうな火山がいつごろ噴火しそうか、何処から噴火するのかについては、監視観測が十分な密度で行われている火山については、事前に起こる異常現象を捉えてある程度予測することが可能になっている<sup>1</sup>。ただし、噴火の規模、様式、継続期間といった噴火推移の予測は困難を伴う。さらに、防災面からは、噴火のタイプ（ハザードの種類）とともに、それらが及ぶ可能性のある距離や方向などのリスク情報についても検討することが要求される。幸いなことに、これまでに蓄積された火山学的知識や観測の経験があるため、火山ごとの噴火の癖や火山間に共通する規則性がある程度存在することが分かっている。これを活用して、ある程度の確度を考慮したより俯瞰的な噴火予測が可能

になりうる。

本論では、欧米で先行して導入されている噴火のイベント・ツリーとその確率的考察について簡単にレビューし、最近、日本において地震火山噴火予知研究（観測研究計画推進委員会, 2010, 2012, 2013）の中で進めてきた噴火シナリオについて解説的に紹介する。

#### 2. 噴火のイベント・ツリー

Newhall and Hoblitt (2002) は噴火事象群を系統樹（イベント・ツリー）として表現し、それぞれの枝の分岐について確率を導入できることを示した（プロバビリティ・ツリー）。そこでは、イベント・ツリーは噴火の前兆から始まり、噴火現象、噴火の規模、距離、区域、被害などのより特殊な現象へと進む。分岐として取り上げられる現象は、それぞれ対象とする火山で、過去の噴火履歴や火山学的知識を考慮して、ありえそうなものを採用することになる。系統樹の最後の確率は、最初の分岐

\* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1  
東京大学地震研究所  
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,

1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

e-mail: nakada@eri.u-tokyo.ac.jp

の確率から最終事象までの枝の確率の積で表されることになる。ここでの基本的な考えは、噴火危機の間に起こりそうなハザードとリスクを全て網羅していることである。確率を推定するには複数のデータセットが使用される。USGSの火山災害援助プログラム(VDAP)で採用している方法は、できるだけ多くのデータセットを利用し、分岐ごとに使うデータセットについて検討専門家チーム全体で合意して確率を求める方法である(Newhall and Pallister, 2015)。Fig. 1にはメラピ火山の2006年噴火の際に作成されたプロバビリティ・ツリーの例を示す。このプロバビリティ・ツリーは噴火実績から積算確率を算出したもので、2010年噴火でも用いられた。

それに対してヨーロッパで使われているのは、検討専門家チーム全員が確率予想を集める方法である。ここでは、メンバー個人の経験や対象火山の熟知度などをもとに、個々のメンバーの信頼性に重みをつけている。そのため、チーム全員が関与した確かさや不確かさが考慮された結果となる。例えば、モンセラート島のスプリエールヒルズ火山では、噴火の前兆が発生した時から、プロバビリティ・ツリーを作成している(Fig. 2)(Aspinall *et al.*, 2002)。また、Marzocci *et al.* (2004)の方法BET(Bayesian Event Tree)は、ベイズ統計理論に基づき確率評価を行うものである。BETはその時の観測事実に依存する手法で、観測項目ごとにそれぞれ重み付けをし、分岐ごとに確率分布を求めて、どちらかの枝に進むかを判断するものである。例えば、地震発生回数、最大マグニチュード、歪み、火山ガスの有無、噴気温度などについて評価の指標を設け、観測項目の評価値を全部掛け合わせて確率密度分布を求め、その確率によって分岐を判断する。BETの考え方は、多数のパラメーターを扱っている点では、Aspinall *et al.* (2002)に類似した面もあるが、BETの方が取り扱っている構造が明らかで透明性があるといえる。

### 3. 日本での噴火のイベント・ツリーの発展

日本では、イベント・ツリーをもちいた噴火シナリオの検討は国土交通省による防災計画<sup>2</sup>などで見られるが、火山研究者が中心になって研究し始めたのは、地震・火山噴火予知計画の中で2009年頃からである。平成21

年から25年まで、文部科学省科学技術・学術審議会の下に実施された「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」<sup>3</sup>において噴火システムの中で噴火シナリオが取り上げられ、そこでは、

『より高度な火山噴火予知を目指して、噴火規模、様式、推移の予測を行うためには、噴火シナリオ(予想される噴火前駆現象や噴火活動推移を網羅した噴火事象系統樹)を作成することが有用である。そのため、地震・火山現象に関するデータベースを活用するとともに、地質調査・解析によって明らかにされた噴火履歴を参照して、噴火シナリオを我が国の主要な活火山について順次作成する。また、過去の噴火時の観測データの再検証や研究成果を取り入れて噴火シナリオを高度化する。活動的な火山について、観測データと噴火シナリオに基づき、火山活動の現状を評価し推移予測を試行する。』

とされた。その中で、(ア)噴火シナリオの作成と(イ)噴火シナリオに基づく噴火予測が試行された。噴火シナリオという言葉はこの時に噴火事象系統樹、すなわち噴火の事象系統樹(ここではイベント・ツリーとする)の意味で使用した。一方で、気象庁など防災関係機関は、2007年の噴火警戒レベルの導入に伴って、過去の代表的な噴火の推移とそれに伴う観測事象と防災対応を連動させたものとして「噴火シナリオ」を導入した。このため、シナリオという言葉の本来の意味と、気象庁などのシナリオの使われ方があったため、噴火シナリオはかならずしも「イベント・ツリー」の意味では理解されていない。本論文では、噴火シナリオを可能な噴火が俯瞰的に見られるイベント・ツリーとして定義し、それぞれの現象の頻度とある程度分岐判断が分かるものを指して用いる。

また、平成26年度から開始した5カ年の研究計画「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究の推進について」<sup>4</sup>では、前期の計画を引き取る形で、噴火シナリオのより高度な理解をするため、

『事象系統樹の高度化による火山噴火予測に引き継がれている。ここではこれまで作成してきた幾つかの火山の噴火事象系統樹に、最新の噴火履歴の情報や、マグマ供給系の進化に関する知見を加え、噴火事象系統樹の高度化を行う。現在の火山学的知見及び本研究計画から得

<sup>1</sup> 科学技術・学術審議会(1998)第6次火山噴火予知計画の推進について(建議)。

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/predict/kazan98.html>

<sup>2</sup> 国土交通省砂防部(2007)火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドライン。

[http://www.mlit.go.jp/river/press\\_blog/past\\_press/press/200701\\_06/070427/gaid.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/press_blog/past_press/press/200701_06/070427/gaid.pdf)

<sup>3</sup> 科学技術・学術審議会(2008)地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について(建議)。

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1218060\\_1933.html](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1218060_1933.html)

<sup>4</sup> 科学技術・学術審議会(2013)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)。

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1341559.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1341559.htm)

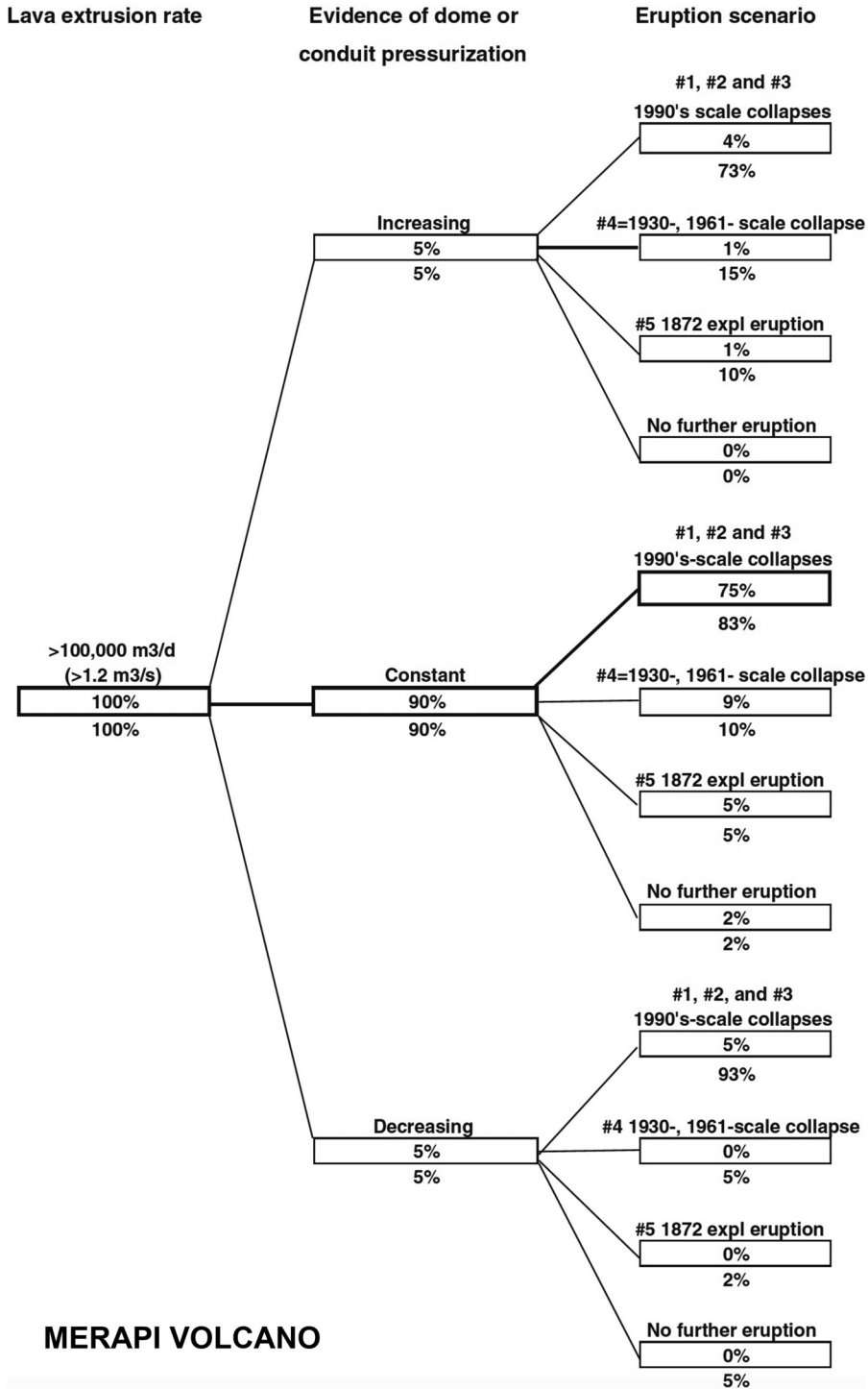


Fig. 1. Probability tree for the activity of Merapi volcano, prepared in June 2006 (Pallister *et al.*, 2013). The cumulative probabilities are shown in the boxes and are the product of the individual probability. Values beneath the boxes are the individual probabilities for the particular event not related to the probabilities of the previous steps in the tree. Actual course of eruption in 2006 is shown in heavy lined boxes. #1 to #5 indicate different areas impacted or scales of eruption. Branches are prepared in terms of lava extrusion rate, pressurization within the dome or the upper conduit and eruption scenarios.

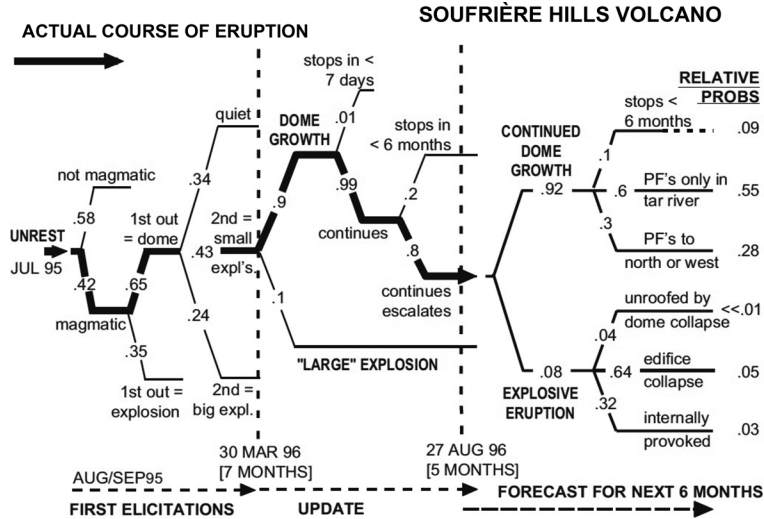


Fig. 2. Probability tree for the activity of Soufrière Hills volcano, Montserrat, prepared in the early stage of eruption (Aspinall, 2006). A broad solid arrow indicates the actual course of eruption. The expert elicitation for forecasting was carried out two times on 30 March and 27 August 1996. The end branches of this tree summarize the anticipated relative probabilities of potentially lethal pyroclastic flow and surge (PF) hazards in different areas.

られる成果に基づいて、火山噴出物の特性や観測データと、噴火事象の分岐の関係からその機構を明らかにし、噴火予測に結び付く事象分岐論理を構築する。」としている。

#### 4. 日本とヨーロッパにおける噴火予知の現状

著者らが噴火予知研究で扱った噴火シナリオは、枝に発生頻度確率を付したイベント・ツリーのことであり、噴火の前兆から始まり、噴火現象、噴火の規模、距離、区域、被害などのより特殊な現象へと進むものである。そこでは、対象とする火山で、過去の噴火履歴や火山学的知識を考慮して、ありえそうな事象を採用した。基本的な考えは、噴火危機の間に起こりそうなハザードとリスクを全て網羅していることである。この段階では、類似火山の噴火の実績を考慮していない。

例えば、気象庁長官の私的諮問機関である火山噴火予知連絡会（以下、予知連）においては、噴火危機に際して、定例会の他に、臨時会議あるいは拡大幹事会などを開催し、各観測機関から持ち寄られた観測情報を検討し意見交換を経て、活動評価や予知連会長見解を出している。最後に出される見解は予知連委員の全員が合意している訳では必ずしもなく、より大きい意見分布を反映しながら、気象庁が調整して、ある程度の安全側に立った

評価文になっている。実は、この流れは、実質的にはヨーロッパで行われている専門家の投票によるプロバビリティの考え方と一部共通したものとみなすこともできる。前者はどちらかという決定論的なプロセスであるのに対して、後者は意見分布を数値化した確率論的なものである。しかも、後者は追跡性と透明性があり、現状だけでなく発展する噴火現象についてもある程度俯瞰的に評価している点が特徴である。また、予知連での会合は危機がより切迫してから活動評価のために集まるのに対して、ヨーロッパで行う確率評価は、長期的と短期的に実施していることも特徴であろう。例えば、モンセラート島スフリエールヒルズ火山の場合には、Fig. 2で示したように、噴火の危機ごとに集まって専門家の意見投票を行った。

#### 5. 主要な火山のイベント・ツリー

##### 5-1 伊豆大島と三宅島

日本で火山研究者が中心となってイベント・ツリーを本格的に作り始めたのは、2008年に火山噴火予知連絡会伊豆部会で伊豆大島を検討した<sup>5</sup>のが最初であろう。しかし、そこでは、伊豆大島で将来において可能な噴火シナリオ全てを網羅するのではなく、噴火履歴からみて最も可能性の高い山頂噴火、割れ目噴火、および可能性は

<sup>5</sup> 伊豆大島の火山活動に関する勉強会報告書（気象庁）

<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/izu/izu-01.pdf>

## MIYAKEJIMA VOLCANO

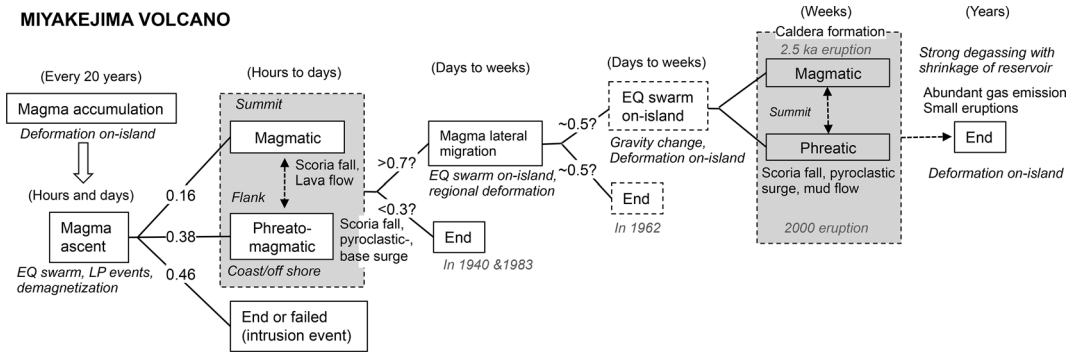


Fig. 3. Eruption event tree of Miyakejima volcano.

低いが大規模な噴火の3シナリオに大別して時系列的に整理した。すなわち、想定したものは、山頂(中央火道)噴火シナリオ、山腹割れ目噴火シナリオ、カルデラ噴火シナリオである。それぞれのシナリオでは、これまで伊豆大島での火山噴火の地球物理学・化学的観測結果に基づいてどのような現象が前兆現象や噴火に伴って起こり観察されるかがまとめられている。また、そこではマグマの組成を3つのグループに分けている。すなわち、グループ1の無斑晶質の玄武岩マグマ、グループ2の無斑晶質で分化したマグマ、グループ3の斜長石が濃集した玄武岩マグマである。これらのマグマは、それぞれ、地殻下部からきた未分化マグマ、浅部のマグマポケットで分化したマグマ、深部マグマ溜りで斜長石が濃集したマグマに対応する。グループ1は大規模噴火の中～後期に、グループ2は割れ目火口からのみ、グループ3は大規模噴火の初期や中規模噴火の際に噴出するという特徴がある。このことを利用してマグマ供給系まで含んだ噴火シナリオを考えている。噴出物の組成の違いによっても噴火のシナリオが異なることを示した点では画期的であるといえるかもしれない。

一方、三宅島の最近300年間の、噴火の前兆地震の発生時間、噴火の継続期間、および、噴火後の地震の継続期間の記録(宮崎, 1984; 津久井・他, 2005など)からは、噴火の発生頻度、噴火間隔、継続時間、前兆現象、噴火中の観測事項などを知ることができる。三宅島ではここ約300年間はほぼ20年おきに噴火が発生しており、時には、噴火の表面現象が見られないこともある(宮崎, 1984)。2000年の噴火では最初の群発地震の移動に伴って、島の西側で海面の変色域が発見された。その後、この海底には噴火口があることが確認された(Kaneko *et al.*, 2005)。このような噴火は、古記録では噴火がなかったものとして記録されていない可能性がある。そこで、約300年間に約20年間隔で定期的にマグマが上昇した

と仮定をし、噴火しなかった20年おきのイベントを噴火未遂と見なして噴火確率を出した(Fig. 3)。また、カルデラ形成は2000年噴火と約2,500年前にしか発生していないことから、Fig. 3の右側にある現象ほど、発生頻度が少なく、計算された確率には大きな誤差を含む。カルデラを作る噴火では火山の地下構造が大きく変化した可能性があるため、地下のマグマ供給系がこれまでどおりに起こり噴火が約20年おきに発生するかどうかは疑問が残るが、噴火後現在までに観測されている、地下のマグマの蓄積を示す地殻変動(防災科研, 未公表データ)が、2000年噴火の前に観察されたものと類似していることは、カルデラ噴火が起こっても、マグマ供給一噴火のタイミングはこれまで通りに起こることを示しているのかもしれない。

## 5-2 伊豆東部火山群

静岡県伊豆東部火山群の火山防災対策検討会でイベント・ツリーを作成した(Fig. 4)。伊豆東部で発生する群発地震活動は、上昇するマグマの周辺部で発生している。したがって、群発地震がどこで発生しているかを知れば、マグマの位置も推定できる。伊豆半島の伊東市周辺で数年置きに発生した約50回の群発地震の解析データを用いている。同地域では、これまでの群発地震の震源と地殻変動解析から、群発地震のイベントごとにマグマが岩脈状に異なる場所に貫入していると理解されている(Morita *et al.*, 2006)。また、深部(7-9km)に貫入する場合と、浅部(3-5km)に貫入する場合とがあり、1989年噴火は浅部よりもさらに浅く貫入したと考えられている。静岡県(2009)が作成したイベント・ツリー(Fig. 4)では、マグマの貫入が深部に留まるか浅部まで貫入するかの確率を過去の事例数で与えている。

陸上噴火は過去に陸域で発生した噴火をまとめて噴火シナリオと確率を求めている。また、伊豆大島の1986年割れ目噴火や富士山の宝永噴火では、浅所に存在して

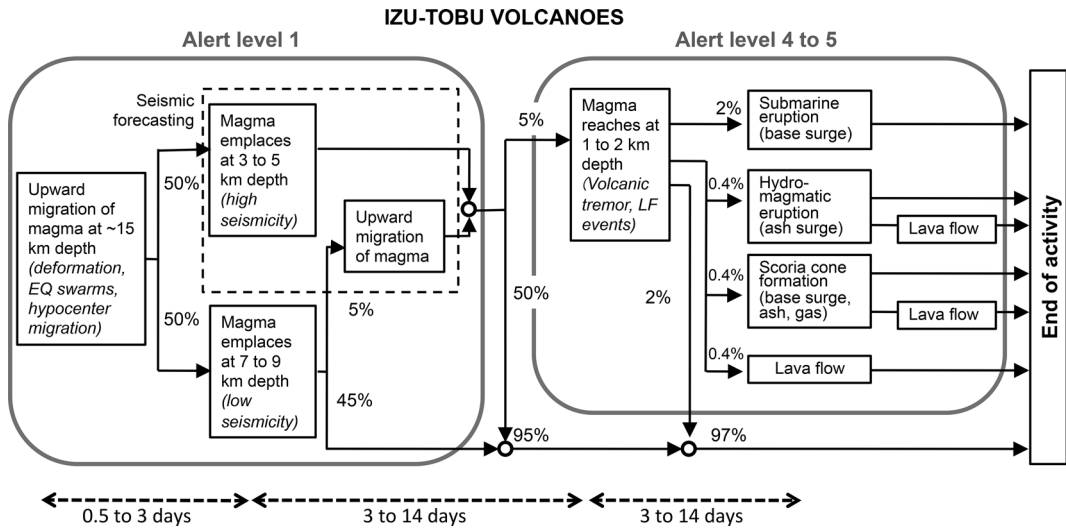


Fig. 4. Probability tree of magma ascent and eruption scenarios for Izu-Tobu volcanoes (Shizuoka Prefecture, 2011).

いたより珪長質なマグマ溜まりに玄武岩マグマが注入して爆発を引き起こしたと考えられている (藤井, 2007). こうした知見を入れて, 伊豆東部でも同様な噴火が起こる可能性が盛り込まれている.

東伊豆火山群で作成された噴火シナリオは, 一般に公開されている<sup>6</sup>. 直近の噴火や最大噴火のみを記載した噴火シナリオは, 行政など使用する側にとっては, 運用することが難しいが, Fig. 4 のシナリオでは, 噴火事象の分岐とそれぞれの枝の確率を示すことによって, 規模や種類の異なる災害リスクがあることを, その確度とともに行政が理解できるようにしている.

### 5-3 シナブン火山

シナブン火山では 2010 年に有史初めての噴火を起こし, それまでは噴火の記録や地質情報がほとんどなく, 2010 年の噴火後調査が開始された (Iguchi *et al.*, 2012). それによると, シナブン火山は約 7 万年前以降に, 溶岩ドーム形成や溶岩流噴火が繰り返されてきた火山である. 9~10 世紀の噴火を含んで溶岩崩落型の火砕流堆積物が火山の斜面を広く覆っており, 一部には, 山体崩壊の堆積物も存在する (Iguchi *et al.*, 2012). また, 岩石は角閃石を含む玄武岩質安山岩~安山岩である. 一方で, プリー式噴火を示す堆積物は過去の堆積物中には存在せず, 調査した範囲では, 山体崩壊が 1 回, 溶岩流・ドームは少なくとも 11 回, 火砕流は溶岩ドームや溶岩流が形成されるたびに発生していたと考えられる. 日本では雲仙岳の火山活動の特徴に似ている. シナブン火山で

2013 年から再開した噴火では, 水蒸気噴火からマグマ水蒸気噴火を経て, 溶岩が山頂に出現した. その後, 溶岩崩落による火砕流が繰り返し発生し, 溶岩ドームは山体裾野まで伸びて溶岩流に成長した. しかし, 火砕流噴火は山頂火口付近からの溶岩崩落によって 2015 年秋の時点でもまだ繰り返し発生している.

Fig. 5 にはシナブン火山におけるイベント・ツリーを示した. 2011 年の段階で著者らの研究グループが用意したものである (Yoshimoto *et al.*, 2013). そこではイタリアの火山等で提案されている, マグマ貫入に伴う山体崩壊 (例えば, Neri *et al.*, 2008) を最初の分岐に設定した. 続いて, マグマ噴火か水蒸気噴火か噴火未遂かを分岐とした. 水蒸気噴火の堆積物は野外ではほとんど確認できないが, その規模が小さいために地層として残りにくいことを考慮して, 水蒸気噴火とマグマ噴火の確率は, とりあえず 90% 以上と 10% 以下としている. マグマ噴火では爆発的噴火か溶岩流・ドーム噴火であるかの分岐を設けた. 調査中にプリー式噴火を示すような堆積物は確認できなかったため, 爆発的噴火の確率を 10% 以下としている. さらに災害面を考慮し, 火砕流の発生の有無をそれぞれの噴火様式の次に分岐させた. なお, 水蒸気噴火の後にマグマ噴火をさらに設定することが可能である. Fig. 5 では水蒸気噴火からマグマ噴火に展開する場合を矢印で示した.

雲仙普賢岳やスフリエールヒルズ火山のような溶岩ドーム噴火でも Fig. 5 と類似のイベント・ツリーを書く

<sup>6</sup> 伊豆東部火山群の地震活動の見通しに関する情報と噴火警戒レベル (気象庁)

<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level/Izu-Tobu%20Volcanoes.pdf>

## SINABUNG VOLCANO

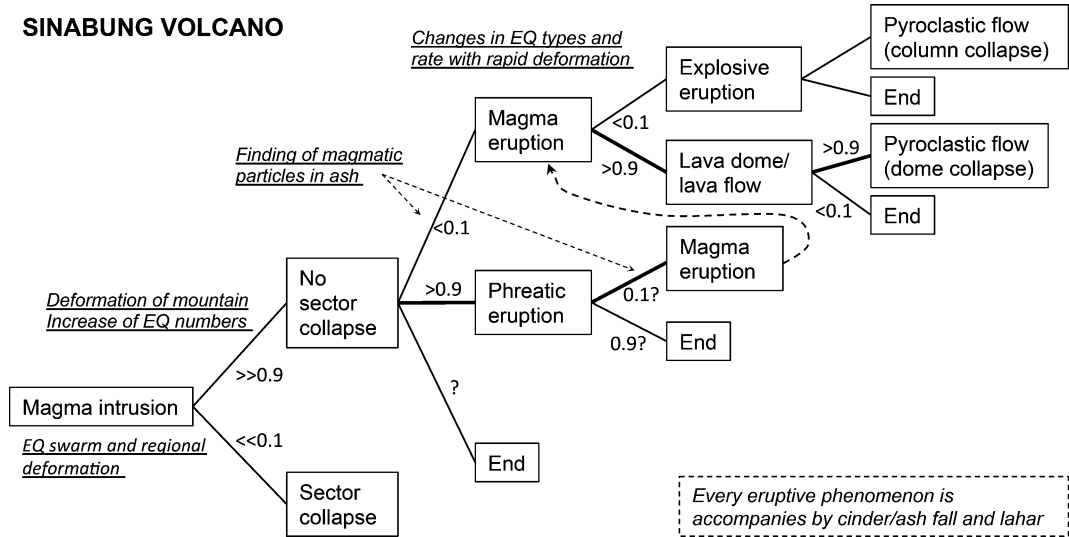


Fig. 5. Event tree for Sinabung volcano which was first prepared in 2011 (modified from Yoshimoto *et al.*, 2013).

ことができる。水蒸気噴火からマグマ噴火への分岐は、水蒸気噴火の噴出物の中にマグマ物質が含まれるようになることでも共通している。

このように、噴火記録のない火山でも、地質情報に基づいて上記のように噴火イベント・ツリーを描くことができるが、それに確率を入れたプロバビリティ・ツリーを作る上では以下の問題がある。

- ・堆積物として残っていない小規模イベントは見逃される。特に、2010年8月末から9月初めにかけて発生した水蒸気噴火の火山灰は2010年のうちは1cm程度の厚さで残っていたが、将来的にきちんと識別できる地層として残る可能性は低い。従って有史時代に起こったかもしれない水蒸気噴火は当然見逃されている。

この解決策としては以下が考えられるだろう。

- ・露出していない堆積物は見逃される。ボーリングやトレンチ調査を実施することによってある程度はカバーすることができるだろう。
- ・類似火山の噴火履歴を導入することによって確率的に記述することが可能になるかもしれない。

したがって、地質情報にのみ基づく噴火確率は、規模の小さな噴火についてフィルターをかけたようなものと考えられる。

#### 5-4 有珠山

有珠山は7~8千年前の山体崩壊の後に、1663年から噴火活動を再開し、それ以降、山頂で5回、山腹で3回の噴火を起こしている(曾屋・他, 2007)。前者はプリニー式噴火に始まり、後者は水蒸気ないしマグマ水蒸気噴火

で開始している。これらの噴火は古記録に残されており、20世紀以降の噴火は地球物理学的観測がなされている。これまでの噴火の特徴は、

- (1) 1663年以降の噴火は、統計上、 $30 \pm 4$ 年おきに起きている。
- (2) 小規模である山腹噴火を除いて、噴火の規模とその頻度には逆相関がある。
- (3) 地震の前兆現象は噴火場所に限らず噴火前の数日間であることが多い。
- (4) 噴火場所に限らず、1663年を除いて、噴火はいつも溶岩ドームか潜在ドームを作って終わっている、などがあげられる。

以上をまとめてFig. 6のようなイベント・ツリーを作成することができる。1910年噴火や1977-82年噴火においては潜在ドームの成長中、2000年噴火では噴火の直前に、有珠山の北麓で新たな断層群が形成された(曾屋・他, 2007)。これらの断層系は有珠山の北斜面がマグマによって北側に押し出された結果生じたものである。そのため、最悪の噴火シナリオとしては、マグマ上昇時か噴火後期の溶岩ドーム形成時に北斜面が崩壊する可能性も検討すべきである。山体崩壊は7~8千年前に起きているが、今後の噴火では山体崩壊も分岐のひとつとして考える必要があるだろう。

さらに噴火の開始や分岐に関しては、2000年噴火の経緯(大島弘光, 私信)を参考に次のようにまとめた。

- (1) 噴火の準備段階として、これまでの噴火では、前兆現象として、明瞭に捉えられてはいないが、有珠山を中心とした広域の隆起現象が期待される。また、

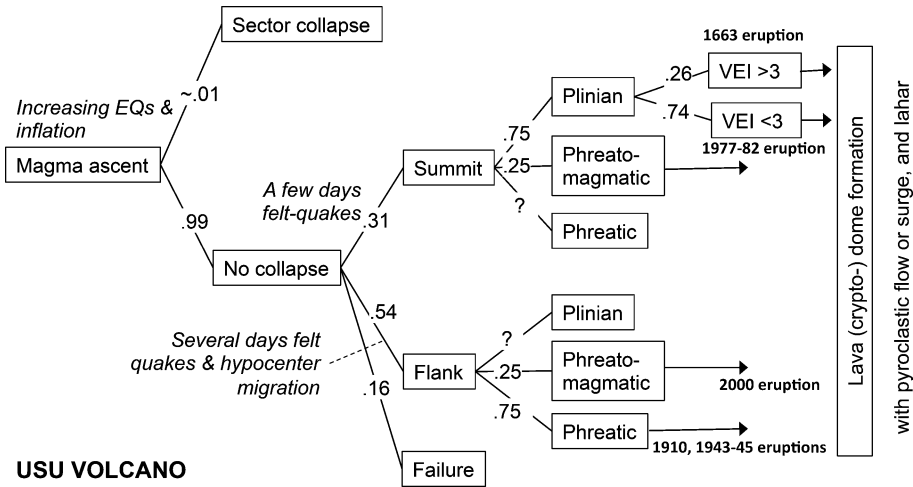


Fig. 6. Eruption event tree for Usu volcano. Every eruption which occurred at Usu volcano accompanied formation of lava dome or cryptodome with pyroclastic flow/surge and lahar.

地震の発生回数も増加してくると期待される。(中期的予測)

- (2) 噴火の数日前から地震活動が活発化する。基盤岩をマグマが突き抜けた段階で一旦地震活動は低下するが、その後、噴火まで地震回数が増加する。(短期的予測)
- (3) 山腹噴火の場合は、マグマの地下浅所での移動(震源移動)に伴い、強い地震が発生し、伊達市など山頂から離れた場所でも有感地震が発生する。その後、地震活動がピークを過ぎた後、噴火が開始する。一方、山頂噴火の場合は、地震活動が加速的に増加し、そのまま噴火に至る。(山頂噴火と山腹噴火の分岐)
- (4) 噴火直前には、マグマの浅所貫入に伴い地殻変動が認められるようになる。(短期予測)
- (5) 同様に、井戸の水位はマグマの貫入に伴い上昇する。(短期予測)

有珠山の過去の噴火では、噴火の規模が大きい場合にプリニー式噴火の発生直後に火砕流が発生している。噴出率が高いほど噴煙柱崩壊が起こったものと理解される。また、この350年間でもっとも噴出量の大きかった1663年の噴火を除き、どの噴火でも最後に溶岩ドームや潜在ドームが形成されている。規模の大きい噴火ほどマグマ噴出率が高かったことが示される(Fig. 7)。ここで、マグマの上昇経路がほぼ同じ断面積であれば、噴出率が高いほどマグマの上昇速度が大きいと考えることができる。マグマの上昇速度は、マグマ中の揮発性成分量にも依存していると考えられ、1663年以降噴出したマグマの

組成が流紋岩からデイサイトへと、順次未分化な方に変化してきており、噴火に関与したマグマの揮発性成分量が時代とともに乏しくなってきたことがひとつの原因かもしれない。しかし、初期のマグマ上昇速度の違いが脱ガスの程度の違いを引き起こし、上昇速度の小さいマグマ中での脱ガス進行によって、より低い揮発性成分量のマグマが形成された可能性もある。初期のマグマ上昇速度の違いが何によるかは不明であるが、仮に何らかの方法でマグマ上昇速度が地表に達する前に観測あるいは推定できれば、どのタイプの噴火になるのか、どんな規模の噴火になるかが決められることになる。

#### 5-5 桜島

三宅島火山では数百年にわたって約20年おきに噴火を繰り返す傾向があったため、噴火の周期性を仮定して、噴火未遂の頻度が推定できた。それに対して、桜島火山はブルカノ式噴火を繰り返す火山であり、規模の小さい噴火を長期間繰り返す時期がある一方で、規模の大きなプリニー式噴火を数百年おきで発生する。そのため、それらの噴火履歴を整理して、噴火の発生確率を算出するのは困難である。ここでは概念的なイベント・ツリーを示した(Fig. 8)。

1914年の大正噴火では $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、昭和噴火では $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ のマグマが噴出した。また昭和噴火以降では $10^5 \text{ m}^3$ のマグマが繰り返し噴火で放出している(例えば、Iguchi, 2013)。ここでは、これらの噴火を巨大噴火、大噴火、中～小噴火、微小噴火と便宜的に呼ぶ。桜島では、大正噴火以降、始良カルデラを中心とする隆起現象が継続しており、ほぼ定常的に年間 $10^7 \text{ m}^3$ のマグマが供給さ



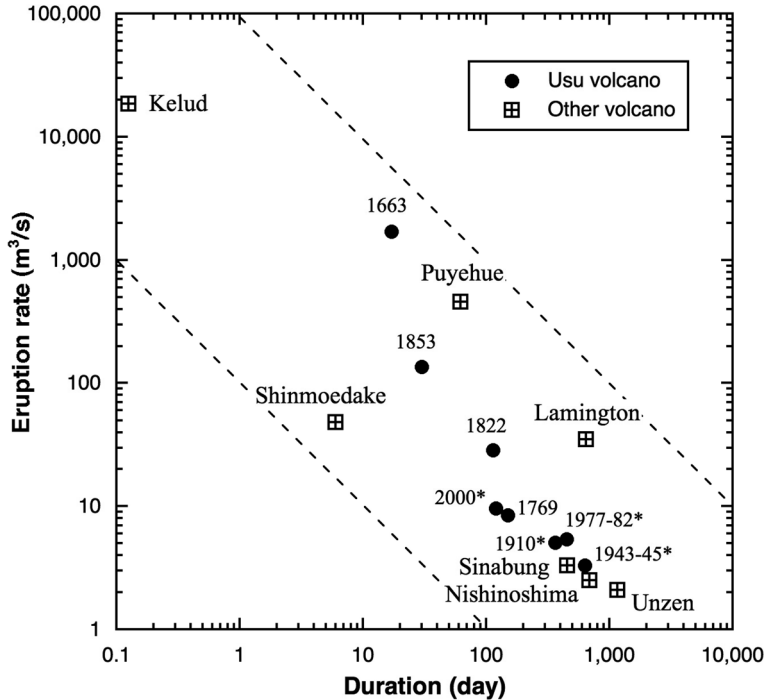


Fig. 7. Relationship of the eruption rates and durations for Usu volcano and other recent eruptions. The volumes of magma intruded in the shallow area (Hiromitsu Oshima, in preparation) were considered for recent four eruptions (shown with \*) when the eruption rates were estimated. When eruption durations are overestimated, the plots may migrate parallel to oblique dashed lines (equi-volume lines). Data for Kelud and Sinabung are from unpublished archives of ERI, Nishinoshima from Maeno *et al.* (in review), for Shinmoedake and Unzen from Nakada *et al.* (2013) and Nakada *et al.* (1999), respectively, and for Puyehue and Lamington from Pallister *et al.* (2013).

れている (Iguchi, 2013). 大正噴火以降のマグマ蓄積と噴火の関係からは、マグマ蓄積からおよそ30年経過すると大噴火やそれに類する噴火が起きる傾向が見出される。すなわち、大正噴火からおよそ30年後に昭和噴火が発生し、昭和噴火からおよそ30年後の1975年からは南岳の山頂噴火が頻発し、その期間の噴出量は大噴火に相当する。

この概念的なツリーに用いた30年の意味するところはよくわからない。始良カルデラからのマグマ供給量が一定であると仮定すれば30年間で蓄積するマグマの量は $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ になる。昭和噴火や南岳の噴火では、いずれもこの蓄積量の約2/3が噴出していることになる。物質科学的に見ると、大正噴火後の噴出物の化学組成を詳細に検討した結果、これまで提案されていた安山岩マグマと珪長質マグマの混合に加えて、新たに玄武岩マグマを加えた3種類のマグマが混合していることが確認された (Matsumoto *et al.*, 2013)。20世紀に入ってから玄武岩マグマの関与が認められ始め、そのためマグマの組成が時間とともに $\text{SiO}_2$ に乏しくなってきた特徴がある。

玄武岩の30年おきの関与がこれらを左右しているのかもしれない。

ここでいう異常現象は、地震やGPS (GNSS)、歪計・傾斜計による地殻変動観測、ガス観測が含まれるだろう。大正噴火の1年から数ヶ月前にかけて広域的な地震活動が活発化し、その後、島内で有感地震が起こっている。また、1年前に島内でガスによる事故が発生した。また、井戸の水位が一旦低下した後上昇し、温泉湧出などの異常が認められた (Omori, 1916)。大正噴火前に観察された地殻変動は、始良カルデラの隆起の後、噴火に先行して島内が隆起し、地下水やガス貯留層に変化が起っていたと解釈される。最近の地殻変動を考慮すると、始良カルデラの地下12kmの深さに存在するマグマ溜まりから北岳の地下約6kmに貫入した後、さらに南岳に移動すると考えられている (Iguchi, 2013)。大正噴火直前に観察された桜島北部の高免地区で0.5mの隆起、8時間前にさらに東部の湯之地区で約0.8mの隆起が認められている。これらに匹敵する地震・地殻変動や異常が、現在の地下坑道を含む観測網で捉えられれば、大正噴火クラ

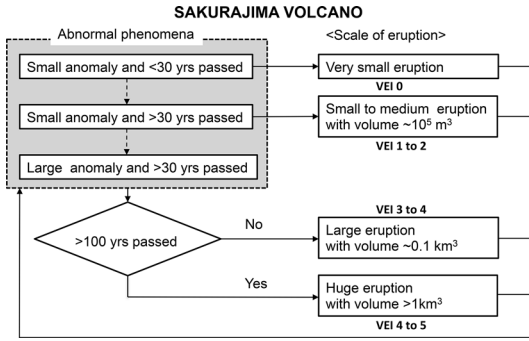


Fig. 8. Conceptual event tree for Sakurajima volcano. Relatively large and huge eruptions occurred at Sakurajima every 30 years and 100 years, respectively.

スの噴火に分岐したと判断されるだろう。

## 6. 議 論

ここまで検討してきたように、イベント・ツリーはほとんどの火山で作成することができる。どのような観点でまとめるかは、それぞれの用途による。ヨーロッパや米国では最初に来る最大イベントに着目し、その影響範囲を取り上げる場合がほとんどである。上で紹介した日本のイベント・ツリーは災害の及ぶ範囲についてはほとんど言及しなかった。それよりも噴火の推移についての理解を重視したツリーとなっている。

噴火回数が多い火山については、噴火履歴を精査することによって、その枝に発生確率を付すことができる。また、噴火観測経験の多い火山については、それぞれの現象に先行した地球物理学あるいは地球化学的な観測データから、分岐に至る過程を抽出することができる。一方、十分な火山学的調査が進んでいない火山や、調査が進んでも噴火実績が少ない火山においては、それぞれ、イベント・ツリー作成が困難であったり、分岐に際しての地球物理学・火山化学的観測でどのような変化が見られるかを言及することが難しい場合がありうる。そこでは噴火のタイプやマグマの組成が似ている類似火山のイベント・ツリーを借用することが一つの方法であろう。

決定論的に限られた噴火シナリオだけを対象に行政などが対策をとることは危険であり、場合によっては無駄な投資になる場合がある。日本の火山噴火予知の過去を振り返ってみても、観測された噴火の多くは当初想定された通りには進行していない。例えば、1986年の伊豆大島火山の噴火においては、山頂噴火が起こると予想されていたが、実際にはカルデラ床からの割れ目噴火であった。1991年から始まった雲仙普賢岳噴火では、溶岩ド

ムが山頂に出現しても、溶岩が崩落して火砕流が発生するとは誰も予測することができなかった。2000年に発生した有珠山の噴火では山頂噴火が起こると考えられたが実際には山腹噴火であった。同じく2000年におきた三宅島の噴火では、これまでと同じような山腹噴火が短時間に起きる単純なものと予想されたが、2000年7月以降に発生した噴火現象は研究者の想定以外のことが続いた。これらの噴火推移予測の失敗の大きな要因は、直近の噴火と同じことが起こると決定論的に予想していたことが大きな原因であったと考えられる。日本の防災機関は、過去の代表的な災害を想定して対策をとっている。砂防事業などでは100年に一度起こる規模の大きな災害を想定するようにしているが、火山噴火については、雲仙普賢岳のように数百年に一度の割合で噴火するものもあれば、数十年間隔で噴火する三宅島のように、数千年に一度の割合でカルデラを作る噴火を起こすものもある。頻繁に噴火を繰り返している桜島でも数百年おきに巨大噴火を起こす。火山防災上でも、対象火山の過去の噴火事象を全て拾い上げ、頻度が低くてもそれらの噴火シナリオを網羅したイベント・ツリーを作成して、防災対策の取り方を考慮しておくことが重要であると考えられる。

## 7. ま と め

前兆が見られた火山において今後噴火がどのように展開し、どのようなハザードがどのような規模で発生し、その被害範囲がどこまで及ぶ可能性があるのかを、事前に整理し社会に指し示すことは、火山噴火予知研究の使命であると考えられる。対象とする火山の噴火履歴や観測経験を活かして、そこで起こりうる現象を網羅したイベント・ツリーを作成することが最初のアプローチであり、それに発生確率を与えるプロバビリティ・ツリーを作成するのが次のステップであろう。この段階で、対象火山や類似火山の過去の噴火において観測された結果から、ツリーの分岐に関する考えを付与することができる。現在、地震火山噴火予知研究<sup>4</sup>で進行しているように、今後、これまでの国内外の類似噴火の観測例をレビューすることによって、噴火イベント・ツリーにおける分岐の判断についてさらに定量的な経験則を導きだすことができると期待される。

## 謝 辞

噴火のイベント・ツリーについては、地震火山噴火予知研究として進められた。なかでも、森田裕一、鍵山恒臣、井口正人、大島弘光氏を始めとする多くの方々との議論がなければ、イベント・ツリーの理解が深まらなかつ

た。藤田英輔, 佐々木寿, 前野 深氏には本稿を改善する上で有益なコメントをいただいた。

### 引用文献

- Aspinall, W. P. (2006) Structured elicitation of expert judgement for probabilistic hazard and risk assessment in volcanic eruptions. In *Statistics in Volcanology* (Mader, H. M., Coles, S. G., Connor, C. B. and Connor, L. J. eds), 15–30. *Geol. Soc. London, Sp. Pub.*, IAVCEI ser. no. 1, Chap. 2.
- Aspinall, W. P., Loughlin, S. C., Michael, F. V., Miller, A. D., Norton, G. E., Rowley, K. C., Sparks, R. S. J. and Young, S. R. (2002) The Montserrat Volcano Observatory: its evolution, organization, role and activities. In *The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T. H. and Kokelaar, B. P. eds), 71–91. *Geol. Soc. London, Mem.*, **21**.
- 藤井敏嗣 (2007) 富士火山のマグマ学. 「富士火山」(荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道 編), 山梨県環境科学研究所, 233–244.
- Iguchi, M., Surono, Nishimura, T., Hendrasto, M., Rosadi, U., Okura, T., Triastuty, H., Basuki, A., Loeqman, A., Maryant, S., Ishihara, K., Yoshimoto, M., Nakada, S. and Hokanishi, N. (2012) Methods for eruption prediction and hazard evaluation at Indonesian volcanoes. *J. Disas. Res.*, **7**, 26–36.
- Iguchi, M. (2013) Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 1–18.
- Kaneko, T., Yasuda, A., Shimano, T., Nakada, S., Fujii, T., Kanazawa, T., Nishizawa, A. and Matsumoto, Y. (2005) Submarine flank eruption preceding caldera subsidence during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **67**, 243–253.
- 観測研究計画推進委員会 (2010) 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画【成果の概要】. 平成21年度年次報告. 科学技術・学術審議会測地学分会地震火山部, 184p.
- 観測研究計画推進委員会 (2012) 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画【成果の概要】. 平成23年度年次報告. 科学技術・学術審議会測地学分会地震火山部, 231p.
- 観測研究計画推進委員会 (2013) 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画【成果の概要】. 平成24年度年次報告. 科学技術・学術審議会測地学分会地震火山部, 272p.
- Maeno, F., Nakada, S. and Kaneko, T. (in review) Morphological evolution of a new volcanic islet sustained by compound lava flows. *Geology*.
- Marzocchi, W., Sandri, L., Gasparini, P., Newhall, C. and Boschi, E. (2004) Quantifying probabilities of volcanic events: The example of volcanic hazard at Mount Vesuvius. *J. Geophys. Res.*, **109**, B11, doi: 10.1029/2004JB003155.
- Matsumoto, A., Nakagawa, M., Amma-Miyasaka, M. and Iguchi, M. (2013) Temporal variations of the petrological features of the juvenile materials during 2006 to 2010 from Showa Crater, Sakurajima volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 191–212.
- 宮崎 務 (1984) 歴史時代における三宅島噴火の特徴. 火山, **29**, S1–S15.
- Morita, Y., Nakao, S. and Hayashi, Y. (2006) A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula. *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2005JB003860.
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y. and Maeno, F. (2013) The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima). Japan. *Earth Planets Space*, **65**, 475–488, doi: 10.5047/eps.2013.03.016.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990–1995 eruption at Unzen Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1–22.
- Neri, A., Aspinall, W. P., Cioni, R., Bertagnini, A. et al. (2008) Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 397–415, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.014.
- Newhall, C. G. and Hoblitt, R. (2002) Constructing event trees for volcanic crises. *Bull. Volcanol.*, **64**, 3–20.
- Newhall, G. C. and Pallister, J. S. (2015) Using multiple data sets to populate probabilistic volcanic event trees. In *Volcanic hazards, risks and disasters* (Papale, P. ed), 203–232. Chapter 8, Elsevier, doi: 10.1016/B978-0-12-396453-3.00008-3.
- Omori, F. (1916) The Sakura-jima eruptions and earthquakes, II. *Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm.*, **8** (2), 35–53.
- Pallister, J. S., Schneider, D. J., Griswold, J. P., Keeler, R. H., Burton, W. C., Noyles, C., Newhall, C. and Ratdomopurbo, A. (2013) Merapi 2010 eruption-chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **261**, 144–152, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.07.012.
- 静岡県 (2011) 伊豆東部火山群の火山防災対策検討会報告書. 地震対策資料, No. 256–2011, 55p.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺幾久子・東宮昭彦 (2007) 有珠火山地質図 (第2版) (1: 25,000). 産業総合技術研究所地質調査総合センター.
- 津久井雅志・川辺禎久・新堀賢志 (2005) 三宅島火山地質図 (1: 25,000). 産業総合技術研究所地質調査総合センター.
- Yoshimoto, M., Nakada, S., Hokanishi, N., Iguchi, M., Ohkura, T., Hendrasto, M., Zaennudin, A., Budianto, A. and Prambada, O. (2013) Eruption history and future scenario of Sinabung Volcano, North Sumatra Indonesia, Abstract of IAVCEI Scientific Assembly in July 2013 (Kagoshima, Japan), Poster 4W\_4D–P14.

(編集担当 前野 深)