

## 1 (2) (2-2) 火山噴火予測システム

「火山噴火予測システム」計画推進部会長 鍵山恒臣  
(京都大学大学院理学研究科)

火山噴火の予知のなかでも、噴火の時期や場所については、十分に観測体制が整備されていればある程度可能になっている。しかし、一旦開始した噴火の規模や様式、推移を予測することは現在の知見だけでは困難である。近年、防災関係者など行政の間で「噴火シナリオ」に対する期待が高まっている。その理由は、噴火シナリオが仕事の工程表に似ており、迫りくる事態が工程表のどの部分に位置しているかを容易に把握することができ、将来起こりうるさまざまな事象も俯瞰的に見ることが可能であるためと思われる。一方、火山専門家にとっても、シナリオを作成することは、これまで培ってきた火山学的な知見を総動員する作業であり、火山学の一層の発展を促す機会となる。しかし、現状の噴火シナリオは、対象となる火山において過去に発生したいくつかの典型的な規模（あるいは直近）の噴火事例を並べたものが多く、それぞれの事象に付随して予想される災害やそれに対する防災対策が記載されているものの、噴火規模や様式ごとに個別のシナリオが作成されている場合がある。このため、防災担当者は、事前におおよその防災対策を計画することはできるが、火山活動の異常が発現した段階では、当該活動がどのシナリオに該当するかが分からないままに対応することになる。

建議では、「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。」と述べられている。すなわち、対象火山について、過去の噴火の発現頻度や噴火様式をまとめあげ、多様な噴火事象の変化を支配する機構を科学的に理解することによって、噴火の規模や様式を含む推移予測をある程度を絞り込むことを目指している。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こと、噴火現象の分岐に「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」ことが求められている。さらには「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」ことが本研究計画のゴールのひとつであり、この研究での成果をマニュアル化し、火山専門家が他の活火山に適応できる道筋をつけることが重要である。

平成24年度は、本計画の細目「ア. 噴火シナリオの作成」については、気象庁〔課題番号：7013〕が既存の知見に基づいて、6火山（倶多楽，恵山，秋田焼山，白山，青ヶ島，鶴見岳・伽藍岳）について噴火シナリオの作成作業を進め、いずれもシナリオの素案が完成した。東京大学地震研究所〔課題番号：1407〕は、より高度な噴火シナリオ作成をめざし、有珠火山の噴火シナリオを試作した。細目「イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測」については、東京大学地震研究所〔課題番号：1408〕は、有珠火山の噴火シナリオ試作にあたり、噴火の分岐を規定する条件について検討を行った。気象庁〔課題番号：7014〕は、火山噴火予知連絡会を構成する機関と協力して火山活動の予測と情報の発表を行っている。また、防災科学技術研究所〔課題番号：3006〕は、平成23年度に観測点

が整備された草津白根火山について、開発した異常変動を自動で検出し変動源モデルを自動推定するシステムを適用し、波形がよく似た相似地震を自動分類し、震源及び発震機構解を高精度に決定する方法を開発した。

## ア. 噴火シナリオの作成

有珠山の噴火シナリオの試作にあたっては、第1段階として平成21年度作成の三宅島と同様に現象の分岐系統樹を作成し、それぞれの分岐点における分岐確率を与えた。分岐系統樹の作成には、これまでの地質学的な噴火履歴研究、古文書による噴火履歴解読、過去4回の地球物理観測や岩石学的研究成果を用いた。以下に、検討した際にポイントとなった点を示す。

有珠山の噴火履歴：

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（表1）、それ以降、山頂で5回、山腹で3回の噴火をおこなっている。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爆発で開始している。これらの噴火は古文書に記録されており、20世紀以降は地球物理学的な観測がなされている。こうした情報を基に、分岐系統樹作成に必要な、活動の推移を整理した。東京大学地震研究所〔課題番号：1426〕によれば、以下の特徴が明らかにされている。

- (1) 有珠山における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対数座標で良い逆相関がある。
- (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。
- (5) 噴火により噴出したマグマの量と火山体浅部に貫入したマグマの量の和は、噴火継続時間との間に負の相関が見られる。

噴火シナリオの試作：

上記の結果に基づいて分岐系統樹を作成し、それぞれの分岐の確率には、東京大学地震研究所〔課題番号：1408〕の検討結果を反映させて図1に示す噴火シナリオを作成した。山体崩壊が起こる確率は約1%であり、山頂噴火と山腹噴火の確率はそれぞれ30と50%である。山頂噴火では、約70%の確率で噴火がプリニー式で始まり、山腹噴火では、約70%の確率で噴火が水蒸気爆発で始まる。

## イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測

平成24年度は、有珠山の噴火シナリオを用いて、予測を行う際にもっとも重要となる事象分岐の判断を観測に基づいてどう扱えるかを検討した。

噴火の前兆について：

有珠山の噴火では有感地震の群発が大きな特徴となっている。噴火に先行する地震活動は、約6ヶ月続いた1943-45年噴火を除いて、数日間の継続の後噴火している。また、

1977-82年噴火や2000年噴火の場合、地震活動には最初一旦小さなピークが見られている（図2）。正確な震源決定ができた2000年噴火の場合は、この時期の地震の震源がほぼ山頂直下の深さ4km程度に集中している。この領域は、地震波および比抵抗構造探査の結果によると基盤岩（6km/s層、10k $\Omega$ -m層）との境界にほぼ相当する。そのため、マグマが基盤岩を突き抜ける際に地震活動が一旦活発化したと考えられる。

また、噴火前に地殻変動も起きると考えられる。古文書では、洞爺湖の湖水面変化が1769年、1822年、1910年噴火で認められており、地殻変動による影響と考えられる。水準測量による観測でも、最近の4回の噴火では、いずれも噴火の前後に有珠山を中心とする広範な地域の隆起が観測されている。また、最近の4回の噴火の噴出量とマグマが貫入して生じたと考えられる隆起量とを合わせた体積は、いずれも1億 $m^3$ のオーダーと推定され、良く似た量のマグマが噴火に関与したと考えられる。この噴火に伴う体積の増加は、これまでの噴火では事前に検知されていないが、地殻変動観測の体制を整備すれば検知可能であると考えられる。

山頂噴火と山腹噴火の分岐について：

山頂噴火は、1977-82年噴火の観測事例や文政の噴火に関する古文書によれば、地震発生頻度が加速的に増加して山頂噴火に至った（図2）。一方、山腹噴火は、地震活動のピークを過ぎて少し経ってから噴火が始まった。前兆地震の震源決定がなされている2000年噴火では、3月29日の午後から震源が山頂下から南西側に移動し始め、30日昼に地震活動のピークを迎え、31日の昼過ぎに山腹から噴火が発生した。このような山腹噴火における地震発生の特徴は、揮発性成分の少ないマグマが地表近くで浮力を失った結果、マグマが横方向に移動したために起きたと解釈することができる。1943-45年噴火や2000年噴火では、伊達市において有感地震が観測されているが、1977-82年噴火では観測されていない。これは山腹噴火の場合に、マグマが火山体浅部で浮力中立点に達して横に広がったために、震源移動と強い地震を起こした可能性が考えられる。2000年噴火では、3月29日の昼過ぎにGPS観測で明瞭な伸びが観察され（岡崎ほか、2002）、3月29日から井戸の水位上昇が認められている（佐藤ほか、2002）。こうした違いは、将来の噴火において、分岐の判断に役立つと期待される。

火砕流・山体崩壊について：

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。噴出率が大き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。噴出したマグマ+貫入したマグマの量（噴火に関与したマグマの量）と噴出継続時間の関係を検討すると（図3）、噴火に関与したマグマの量が多い噴火では、噴火継続時間が短くなる傾向がある。この結果は、大きい噴火ほどマグマ噴出率が高かったことを示している。すなわち、マグマの上昇経路がほぼ同じ太さ（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かったことを意味する。過去350年間で見ると、古い噴火ほど噴出したマグマ量は大きい傾向があるので、マグマの上昇速度が時代と共に遅くなってきている可能性がある。マグマの上昇速度は、マグマ中の揮発性分量に依存していると考えられ、1663年以降噴火したマ

マグマの組成が流紋岩からデイサイトへと、順次未分化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とも考えられる。さらには、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達成された可能性もある。

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。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と思われる。

噴火の開始・分岐について：

この350年間の噴火、特に最近の4回の噴火をレビューすると、噴火の開始や分岐に関して次のようにまとめることができる。

- (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、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、マグマは浮力を保ったままで上昇し、地震活動が加速的に活発化してそのまま噴火に至ると考えられる。（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短基線の伸びが認められるようになる。この際、浮力のあるマグマと浮力を失ったマグマとでは山体の膨張速度に違いが生じると期待される。（短期予測）
- (5) 同様に、井戸の水位はマグマの貫入に伴い急激に上昇する。（短期予測）

### これまでの課題と今後の展望

近年、防災関係者などの間で「噴火シナリオ」に対する期待が高まっている。しかしながら現状の噴火シナリオは、対象となる火山において過去に発生したいくつかの典型的な規模の噴火事例を並べたものであり、防災担当者は、火山活動の異常が発現した段階では、当該活動が結果としてどのシナリオに該当するかを知らされないままに対応をスタートさせることにならざるを得なかった。予知計画がめざしている噴火シナリオは、発生しうる事象を網羅した分岐系統樹の形態をとり、ある事象の後に分岐する事象が複数ある場合、その分岐確率とその分岐の判断を示したものをめざしている。平成21年度に作成した三宅島のシナリオは、十分な数の噴火履歴データに加えて、異常が発生しても噴火しない噴火未遂についても大胆な仮定を設けて（およそ20年間隔で異常現象が起きているという知見に基づき、20年ごとの各時期に噴火が発生しなかった場合は噴

火未遂とした)、分岐確率を計算した。

平成22年、23年度に作成した桜島では、異なる課題が明らかとなった。桜島では、南岳山頂火口(最近では昭和火口)において年間400回程度の噴火が発生するのに対して、大正噴火に代表されるような山腹割れ目噴火は歴史時代に数例しか発生していない。このように、高頻度小規模噴火が発生している火山において低頻度大規模噴火も対象とした噴火シナリオを作成するには、克服すべき課題が多い。桜島火山で試作した噴火シナリオでは、高頻度小規模噴火・マグマ蓄積の活動形態と低頻度大規模噴火の活動形態があることを明らかにし、30年程度の周期で活動形態の分岐が訪れると考えられた。その噴火形態の分岐は、火山体浅部へのマグマの上昇率によって生じると提案された。

今回対象とした有珠山は平成21年度に対象とした三宅島と似たアプローチであり、桜島のような高頻度小規模噴火と低頻度大規模噴火といった活動形態の組み合わせではない。すなわち、過去の噴火履歴を統計的に処理して分岐確率を計算した。ここでは、三宅島の場合には顕在化しなかった山頂噴火と山腹噴火の分岐や火砕流・山体崩壊などの分岐事象を考慮する必要があることが明らかになった。これらの分岐のいくつかは、火山体構造探査や過去の観測研究の成果を考慮することによって、マグマの噴出速度によって、噴火の規模や山頂噴火と山腹噴火の分岐が規定され、地震活動にも違いが生じることが明らかになった。このマグマの噴出速度は、マグマの異なる上昇速度に依存し、その原因となるマグマの揮発性成分の量が規定している可能性が指摘された。噴火に関与したマグマ量は山頂と山腹噴火で違いがない。この350年間で噴出率・マグマ量共に時代と共に小さくなっていることから、揮発性成分量が減少してマグマの上昇速度が低下している可能性がある。また、物質科学的研究からは、マグマ供給システムが時代とともに変化している可能性も指摘されている。こうした情報を噴火シナリオにどう反映させればよいか、今後検討していく必要がある。

## 成果リスト

Iguchi, M., Surono, Nishimura, T., Hendrasto, M., Rosadi, U., Ohkura, T., Triastuty, H., Basuki, A., Loeqman, A., Maryanto, S., Ishihara, K., Yoshimoto, M., Nakada, S., Hokanishi, N. (2012) Methods for Eruption Prediction and Hazards Evaluation at Indonesian Volcanoes. *Journal of Disaster Research*, 7, 26-36.

中田節也・森田裕一・大久保修平・上嶋 誠・清水洋ほか(2012) 2011年霧島火山(新燃岳)噴火に関する総合調査(2)。第49回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1-6.

井口正人, 2012, 桜島の火山活動予測を考える上で必要なデータベース, 月刊地球, 34, 322-330.