

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)
同部会委員 中田節也
(東京大学地震研究所)

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、噴火シナリオが通常の業務の中で慣れ親しんでいる工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、現在わが国で使用されている噴火シナリオは、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が多く、それぞれの事象に付随して予想される災害と、それに対する防災対策が記載されているが、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。したがって、防災担当者は、事前におおよその防災対策を企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る。どのシナリオが該当しそうであるかを判断することは火山の専門家であっても難しいことであり、きわめて高いハードルである。

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、対象火山の過去の噴火の履歴の発現頻度やパターンを利用し、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で、噴火の規模や様式を含む推移予測をある程度を絞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25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、アトサヌプリ、岩木山、鳥海山、蔵王山、日光白根山について、シナリオ作成作業を開始した。また、平成23年度に作成した秋田焼山では、地元との調整等の準備が整ったことからレベル運用を開始した。また、日光白根山、白山については、関係機関によって構成される火山防災協議会が設置され、シナリオ素

案の説明も開始された。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、富士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、インドネシア・シナブン火山の噴火シナリオと実際の噴火の推移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24年度に地震を自動で検出し、波形がよく似た相似地震の自動分類、震源及び発震機構解を高精度に決定する機能を開発したが、平成25年度は、地殻変動データも加えて火山活動の異常判定を行う手法を開発した。以下にそれぞれの概要を示す。

ア．噴火シナリオの作成

平成25年度は、富士火山について噴火シナリオの作成を試みた。近年、産総研を中心に富士山の火山地質に関する報告（産総研報告57巻11/12号2007年発行、山梨県環境科学研究所編「富士火山」2007年発行など）が複数見られ、噴出時期・場所・様式に関する情報がそろってきている。本研究では、それらの成果に基づいて富士山の噴火シナリオを試作した（図1）。これまでに作成してきた活動の分岐系統樹を基に、過去に起きている噴火現象の組み合わせがこの系統樹に網羅されていることを確認したうえで、それぞれの分岐確率を計算した。山体崩壊の分岐確率をどのように計算するかが問題であり、その確率は以下のように計算した。富士山ハザードマップ検討委員会報告書（内閣府2004年6月）に報告されている噴火の噴出率と頻度の図を活用し、火山爆発指数（VEI: volcanic explosive index）とその頻度との関係を検討すると、図2に示すように、この約2000年間に、VEI5（2回）、VEI4（7回）、VEI3（62回）、VEI2（80回）が起きていた。これは1000年に75回の噴火があったことになる。一方、約3000年前に山体崩壊（御殿場泥流）が起きているので、噴火イベント225回（3x75）に1回程度の頻度と考え、山体崩壊の発生頻度は1%以下と推定した。なお、富士山はここ300年間噴火をしていないものの、最近2000年間を平均すればインドネシアのメラピ火山と同程度に噴火を繰り返していることが分かる。

次の分岐は、噴出場所としている。山頂部の噴火では、プリニー式噴火を起こした実績があることと、スコリア丘が崩れて火砕流が発生した実績があるため、山腹・山麓部の噴火とは区別する必要がある。たとえば、宝永噴火と砂沢噴火では、山頂部の南東側を火口とし、珪長質のマグマ溜まりとのマグマ混合を起こしてプリニー式噴火を起こした。また、火砕流発生は急傾斜面での火口周辺で定置できなかった火砕物が斜面を流れ下った現象である。この噴火場所の分岐確率は、AD600以降に発生した24イベントのうち、46%が山頂部（標高3000m以上）、54%が、山腹・山麓部（標高3000m以下）となる。

3つめの分岐は噴火スタイルとしている。富士山の噴火スタイルは、プリニー式噴火を除けば、ストロンボリ式～ハワイ式噴火がほとんどで、ブルカノ式噴火はこれまでに記録がない。玄武岩を主体とするベスビオ火山やエトナ火山においても同様にブルカノ式噴火が報告されていないようである。一方、水蒸気爆発や火山灰噴火は、ストロンボリ式噴火に先行して発生する可能性が大きいと考えられるが、地質学的には堆積物として残っていないので、その確率を計算することができない。図に示す噴火シナリオでは、

灰噴火を除く噴火タイプの頻度を示した。なお、プリニー式噴火は宝永・砂沢噴火であり、2例とも山頂部の南東部を噴出源として発生している。いずれの噴火も、噴出量で1km³クラスの噴火であり、山腹の貞観噴火（ストロンボリ式・ハワイ式噴火）を除いて、特に規模が大きいのが特徴である。

本シナリオでは、留意事項として、災害誘因現象を付記している。3000m以上の山頂部噴火ではスコリア丘の崩落や火山弾の大量落下による小規模の火砕流、プリニー式噴火による噴煙崩壊による火砕流が挙げられる。ストロンボリ式～ハワイ式噴火においては、溶岩流が斜面を流れる。火山灰を放出する噴火では、土石流・泥流が降灰地で発生すると考えられる。

今後は、観測の観点から、これらの噴火事象の分岐がどのように起こるのかを、国内外の類似火山の噴火を参考に検討することが急務であろう。

イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測

平成25年度は、9月に噴火を再開したインドネシア共和国スマトラ島北部のシナブン火山について、噴火シナリオに基づく噴火予測の試行を行った。なお、同火山の噴火シナリオは、東京大学地震研究所〔課題番号：1426〕が、平成22年度に作成していた。シナブン火山では平成22年に水蒸気爆発が起こったが、それまで噴火記録がなかったため、インドネシアの火山地質災害軽減センターと共同で地質調査を行い、地質図を作成するとともに、分岐系統樹を作成していた。小規模な噴火に関する地質情報は限られるが、同火山はプリニー式噴火を起こしたことがなく、厚い溶岩流と溶岩ドームが山頂から噴出し、それが崩れて火砕流が繰り返して発生する癖のある火山であることが明らかとなった。また、最新の噴火は9～10世紀の安山岩マグマの噴火で、溶岩が崩落して発生した火砕流の堆積物は南東方向に約4.5kmまで分布していた。作成した噴火シナリオで最も頻度の高い噴火は、9～10世紀の噴火のように、山頂部からの溶岩流出と、それに由来する溶岩崩落による火砕流発生であった（図3）。

平成25年9月から再開した噴火は、11月には水蒸気爆発から、ブルカノ式噴火を含むマグマ水蒸気爆発に移行し、12月下旬には、山頂火口に溶岩が出現し、12月末から溶岩崩落による火砕流が発生した。火砕流の規模とその流下範囲は9～10世紀の噴火とほぼ同じであった。詳細な調査の結果からは、以下の特徴が明らかとなった。火山灰の構成物比の観察からは、11月中旬からマグマ物質の関与が認められた（特徴1）。地元のセンターが実施している観測では、マグマ水蒸気爆発のステージを過ぎた12月中旬から地震のタイプが火山性のものからやや長周期のハイブリッド型に変化し、山頂火口縁の小崩落が進んだ（特徴2）。山頂部を取り囲むGPSによる地殻変動は、9月から徐々に山体膨張を示し、12月中旬から膨張速度が加速していた（特徴3）。これらの観測結果は、水蒸気爆発からマグマ噴火に至るか、さらに、山頂部から溶岩が出現するかどうかの分岐判断に、火山灰に含まれるマグマ物質の有無や地震活動・地殻変動の観測データが重要な役割を果たせることを示した。

これらの噴火の進行の仕方は、1990年から開始した雲仙普賢岳の噴火の推移と酷似している。すなわち、90年11月に水蒸気爆発が開始し、翌年2月の噴出物からマグマ物質が認められ、91年5月下旬に溶岩が山頂火口に出現した。さらに、その数日後から溶岩崩落による火砕流が発生し、崩落を繰り返しながら溶岩ドームが成長し続けた。これ

らの推移の詳細なタイムスケールは異なっているが、これらに伴った地震活動や地殻変動の推移は、今回のシナブン火山の噴火と類似している。

地質学的に作成可能な噴火シナリオからも、分岐の確率を付すことはある程度可能であり、シナブン火山の噴火予測においては有効であった。過去の噴火観測の例がなくとも、類似火山の噴火観測のデータを融合することによって、分岐判断に使用可能であることを示している。このことは、噴火シナリオの実用化に関して、対象火山の過去の観測データだけでなく、国内外の類似火山の観測データを収集し参考にすることや、WVOdat など、実在するアーカイブを活用して分岐判断に供することの重要性を示している。

今計画のまとめと今後の課題

本計画を実施してきた5年間において、防災関係者などの中で「噴火シナリオ」に対する期待が高くなってきた。その理由は、噴火シナリオが工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できるためと思われる。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る。このシナリオを第0世代と呼ぶならば、予知計画がめざしているシナリオは、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、その分岐確率を示したものを目標としている。

本計画の目標の1つは、噴火シナリオ作成の標準的な手法を確立することであった。この5年間にシナリオ試作を繰り返すことによって、第1に、火山学的に妥当な活動の推移を示す標準的な系統樹を確立し、第2に、噴火履歴に基づいて分岐の確率を与える手法を確立した。

適応した個々の火山によって、固有の問題が明らかとなり、個々の解決事例は、今後のシナリオ作成に有用な経験をもたらしてくれた。

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らしい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する）、分岐確率を計算した（ここでは第1世代のシナリオと呼ぶ）。噴火未遂を考慮した噴火シナリオを作成するには、より高度な履歴調査が求められることになる。

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（ここでは第2世代と呼ぶ）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した。その分岐では、火山体浅部へのマグマの上昇率によって巨大噴火から小規模噴火への分岐が規定されるとした。

平成24年度に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ている部分があり、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はない。したがって、第1段階として、過去の噴火履歴を統計的に処理して分岐確率を計算している。しかしながら、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、火山体構造探査の成果と比較することで、マグマが基盤を突き抜けて来る際に地震活動に変化が見られることが明らかとなったほか、マグマ中の揮発性成分の量によって山頂噴火と山腹噴火の分岐、火砕流発生の分岐などが規定されている可能性が指摘された。揮発性成分の量に関連して、噴火に関与するマグマの体積はそれほど変化していないが、この350年間で噴出率が時代と共に小さくなって来ていることから、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指摘された。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。

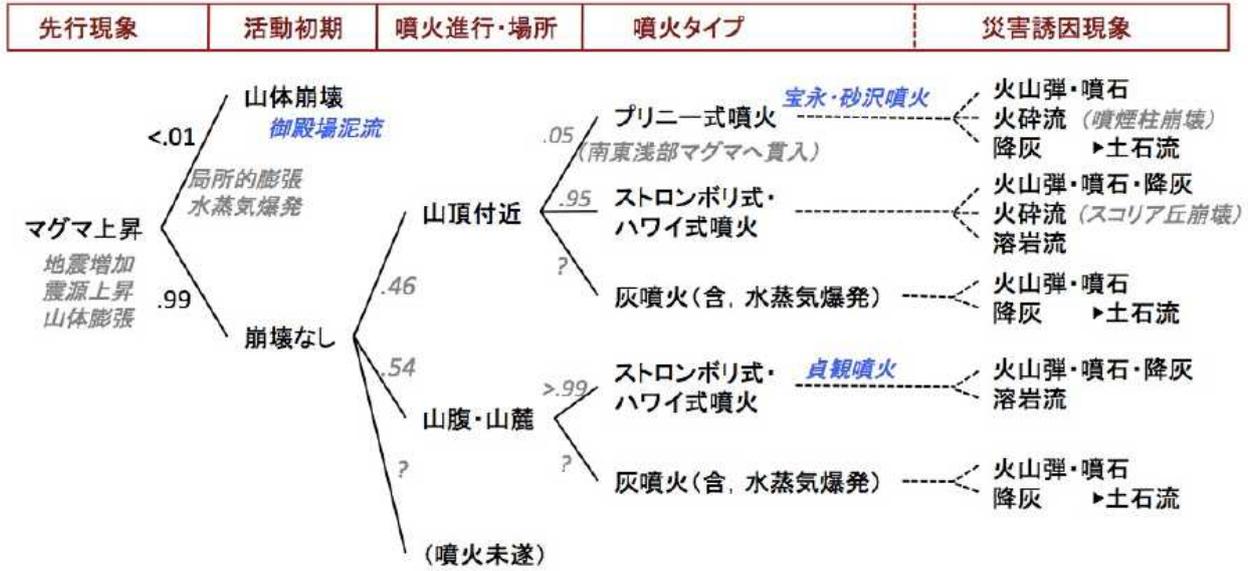
平成25年度に対象とした富士山でも、山頂噴火と山腹・山麓噴火によって噴火形態の分岐に違いが見られることが明らかとなり、分岐を判断する際に、過去の事例数に基づく確率だけではなく、地震の震源分布などの観測データによる判断も必要であることが明らかとなってきた。

今後の課題の中で最も重要な課題は、第1に、分岐の決定を過去の事例数に基づく確率だけによることなく、リアルタイムで進行中の観測データに基づいて分岐を決定すること、第2に、通常の噴火（高頻度小規模噴火）や噴火未遂の繰り返しから低頻度大規模噴火への分岐を判断する手法を開発することである。

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．



* 山頂付近は3000m以上。ハワイ式噴火は顕著な火口列を形成する割れ目噴火。灰色斜数字は不明現象(?)を除く頻度。災害誘因現象は分岐ではなく、発生のある可能性のある現象を列記した。

図1. 富士山の噴火シナリオ試作版 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1407])

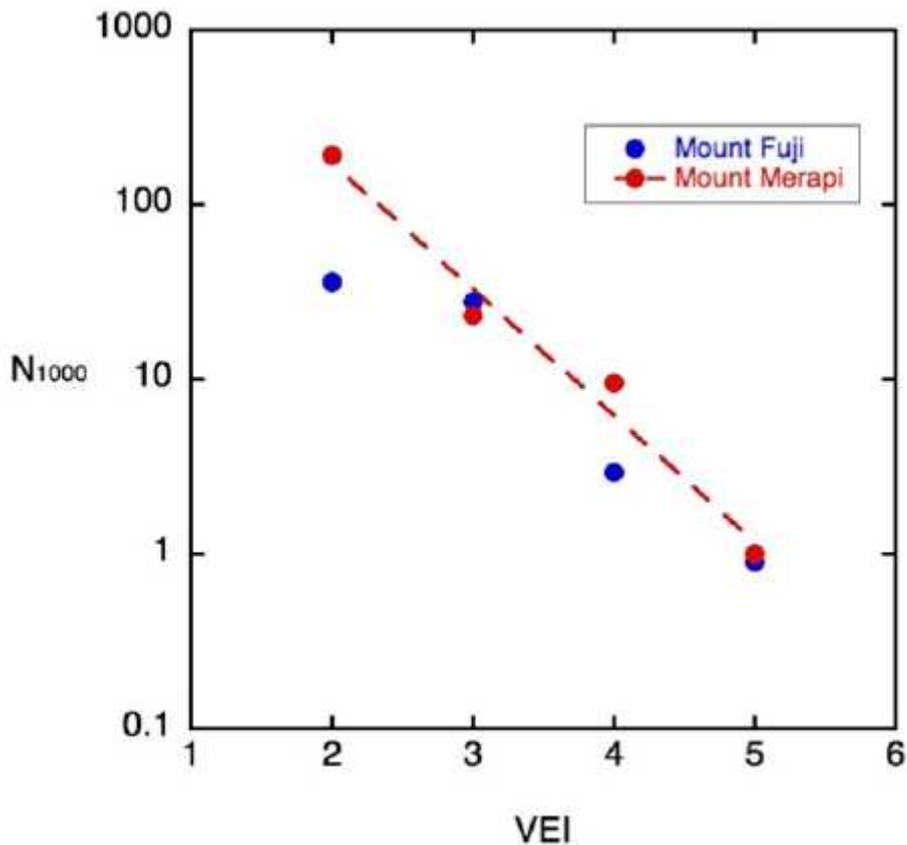


図2. 富士山における最近2000年間の噴火の規模と頻度の関係

N_{1000} は、1000年当たりの噴火回数。比較のためにインドネシア共和国メラピ火山の同関係も示した。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1408])

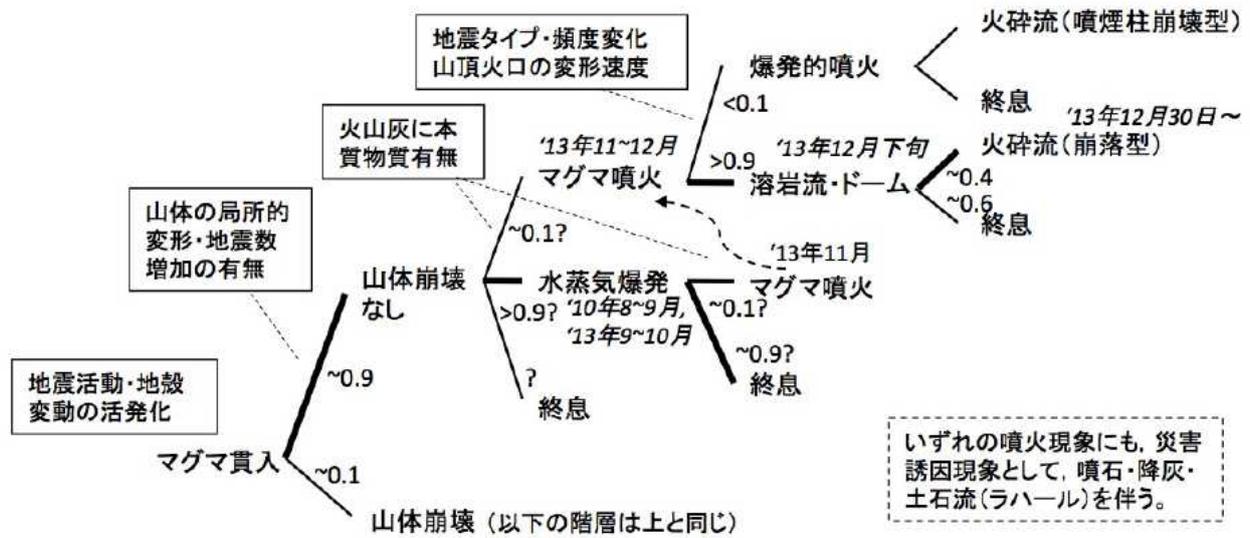


図3. インドネシア共和国北スマトラ、シナブン火山の噴火シナリオ
平成22年度成果として作成した噴火シナリオに、噴火の推移と分岐の判断とされる観測事象を加えた。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1408])