

## 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。これは、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。更には「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。

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秋田焼山、白山において噴火シナリオの作成を行い、平成24年度に噴火警戒レベル導入をめざしている。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、平成22年度に作成した桜島火山噴火シナリオ暫定版の問題点の検討を行った。東京工業大学〔課題番号：2901〕は、火口湖の熱的モニタリングに基づいて地下から供給される熱エネルギー量を推定し、熱水系が卓越する火山噴火におけるシナリオ作成に必要な情報を収集している。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、平成22年度に霧島・新燃岳の噴火災害と防災対策に対応するため急遽作成した噴火シナリオについて、平成23年度も実際の噴火の推移とを比較して問題点を洗い出す作業を行った。また、伊豆東部火山群について気象庁、静岡県と協力して噴火シナリオの作成と防災対策の検討を行った。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21年度までに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により、霧島山等の火山についてモニタリングを実施し、新燃岳噴火活動に伴う異常変動を検出することに成功している。この研究は、噴火シナリオにおいて事象分岐を判断する際に必要な情報を提供すると期待される。

## ア. 噴火シナリオの作成

桜島火山の噴火シナリオの作成には、本研究者らがこれまでに作成してきた火山とは異なる特性がある。具体的には、通常多くの火山では噴火の準備過程が進行した後に様々な噴火が発生し、時間的にも推移が予想される。噴火シナリオは、そのイベントの分岐を示す形で作成されてきた。しかし、桜島の噴火には、高頻度に発生する小規模噴火と稀にしか発生しない低頻度大規模噴火が混在し、そこにある種の規則性が見られる状態であった。こうした事情から、昨年度は桜島の噴火を高頻度大規模噴火のループとそこからある条件で低頻度大規模噴火に移行するシナリオを暫定的に作成した。本年度は、小規模噴火のループから大規模噴火への分岐の条件などについて、地球物理学的観測研究と噴出物の物質科学的研究の面から検討を加えた。

昨年度作成した桜島の噴火シナリオは、以下の点を基本情報としている。桜島火山では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数 $10^5 \text{ m}^3$ のマグマ噴出が繰り返されている(図1)。ここでは、これらの噴火を巨大噴火、大噴火、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 $10^7 \text{ m}^3$ のマグマが供給されている。大正噴火以降のマグマ蓄積と大噴火との関係を見ると、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、大噴火に匹敵するマグマを噴出している。1993年からは三たびマグマ蓄積が始まり、その約30年後に当たる2020年代には、隆起量が、大正噴火直前の状態とほぼ同じになる。

このシナリオにおいて残されている3つの疑問について検討をおこなった。第1の疑問は、分岐条件における30年の意味である。桜島では、上記のようにマグマの蓄積開始から約30年後に何らかの噴火現象の変化が起きている。一定の供給量を仮定すれば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が明らかとなった。しかし、この30年というスケールをどのような要因が規定しているのかは、地球物理観測の観点から明らかにすることはできなかった。一方、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(図2)。図では、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は時間とともに $\text{SiO}_2$ に乏しくなっている特徴がある。また、30年毎にその関与が大きくなっているように見える。大正噴火と1975-90年にその割合が大きく、現在はそれほどでもない。玄武岩関与の程度は、大正噴火で最も大きく、昭和噴火や1970-90年噴火ではやや大きく、2009年以降の噴火で小さいことがわかる。

第2の疑問点は、大規模噴火へ移行する際にどのような前兆現象が発生するかである。大正噴火の1年から数か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、井戸の水位も一旦低下した後上昇し、温泉湧出も認められている。昭和噴火の前には、先行的な噴火活動が1935年からあったが、火山性地震や地殻変動等についての情報は不明である。こうした異常現象は、最近の観測研究からは以下のように解釈される。

大正噴火の前兆現象と、最近の有村観測井の観測結果を比較すると、桜島の地下に広くCO<sub>2</sub>貯留層の存在が考えられる。始良カルデラ及び桜島のマグマ溜まりの存在を考慮すると、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の隆起が起っていたと解釈される。

第3の疑問点は、仮に将来大規模な噴火が発生するとして、どのような異常が観測されれば前兆と判断できるかである。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、更に南岳に移動すると考えられる。大正噴火直前に観察された高免地区で0.5mの隆起を説明するためには1.4x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> のマグマの貫入が起きていたと思われる。これと同程度の貫入が起きれば、有村坑道で128マイクロrad、春田山で132マイクロstrainの変動が観測されるはずである。大正噴火では、8時間前に更に湯之地区で約0.8mの隆起が認められている。これを説明するためには、南岳の地下で1.7x10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>のマグマ貫入が必要である。これと同程度の貫入が起きれば、有村坑道で243マイクロrad、春田山で161マイクロstrainの変動が起きると考えられる。これに匹敵する地殻変動が観測されれば、噴火シナリオでは大正クラスの噴火に分岐したと判断されることになる。

#### イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測

2011年に噴火を開始した新燃岳では、主な噴火活動の直後からマグマ溜まりの膨張を示す地殻変動が再開して2011年11月頃まで継続した。その後、地殻変動の停滞が続いている。今後、新燃岳の噴火がどのような推移をたどるのか、噴火が再開するとしたらいつ頃、どのような様式や規模で起こるのかなどは、火山防災上の重要な関心事である。また、本予知計画で進めている噴火シナリオによる噴火予測を実際に試行する機会でもある。平成23年度は、2011年2月に作成したシナリオ第2版が予測していた火山活動の推移を実際の活動と比較検討した。2011年2月以降の活動としては、6月中旬まで発生したブルカノ式噴火や、その後10月初めまで数回繰り返された水蒸気噴火などがある。図3は、その検討を行った結果改訂された噴火シナリオ第3版である。この改訂では帯水層の有無と、マグマの上昇速度による噴火形態の違いを考慮している。特に新燃岳は帯水層が発達した火山であり、水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発が頻繁に起こる火山と考えるべきであることが判明した。

また、火口に蓄積した溶岩による火道上部の閉塞によって、噴火開始場所毎にどのような噴火で開始し推移するかを示したのが図4である。新燃岳では今回の噴火の以前に生じていた火口列が新燃岳火口の西側斜面にも発達している。また、今回の噴火の進行に伴い、新燃岳火口の内側で東寄りにも新たな火口が生じた。2011年1月噴火の中心火口(蓄積溶岩の中央部)を使うのか使わないのかによって、噴火開始時の噴火様式が異なると考えられる。火口外側斜面で噴火が起こった場合には、火砕流や溶岩流が火山麓に流れやすくなることが想定される。蓄積溶岩のある2011年噴火の火口を使う場合は、噴出速度にもよるが、まず火道上部の溶岩を吹き飛ばす噴火から開始すると予想される。また火口内での噴火開始であれば、噴出物は一旦火口内に留められると考えられるので、火砕流や溶岩流の火口外への流出の可能性は規模によっては小さくなると思われる。火山噴火予知連や自治体の防災では、このシナリオも念頭に置いて検討が進められている。

この項目では、東伊豆火山群の噴火シナリオ作成も行われた(図5)。この噴火シナリオでは、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ことが分かっている(Morita et al., 2006)。また、深部(7-9 km)に貫入する場合と、浅部(3-5 km)に貫入する場合とがあり、1989年噴火は浅部よりも更に浅く貫入したと考えられている。シナリオでは、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。

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、東伊豆の浅部に存在する珪長質マグマ溜まりに、玄武岩質マグマが貫入して噴火が発生すると考えている。

東伊豆火山群で作成された噴火シナリオは、行政に公開されている。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、今回のシナリオでは、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あり、大きな成果と言える。

### これまでの課題と今後の展望

前の節にも示したが、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。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。防災や報道関係者からしばしば指摘される苦言のひとつに、「火山専門家は様々な噴火の可能性を提示するが、その可能性の軽重を示してはくれないので困る」というものがある。このシナリオ（ここでは第0世代と呼ぶ）は、まさにこの苦言に該当する。

これに対して、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っている。ある事象の後に分岐する事象が考えられる場合、その分岐確率は、過去に発生した事象の頻度によって決定される。この形態のシナリオを作成するには、十分な噴火履歴調査が必要となる。平成21年度に作成した三宅島のシナリオは、その裏付けとして十分な数の噴火履歴データがあったことが大きい。この第1世代のシナリオは、噴火履歴調査が整えられれば、多くの火山で作成が可能となる。ただ、このシナリオの分岐確率には、異常が発生しても噴火しないという分岐を含めることは困難である。噴火履歴には噴火しなかった（噴火未遂）という記録が残ることは稀だからである。三宅島では、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いて噴火未遂の分岐確率を計算しており、特殊な事例である。噴火未遂を考慮した噴火シナリオ（ここでは1.5世代と呼ぶ）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、三宅島とは異なる問題点を明らかにした。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。新燃岳の噴火シナリオにも同じ問題点があるが、一般に、噴火やそれに関連する事象の観測、解析例が少ない火山においては同様の問題がある。噴火事例や観測解析例が少ない火山においては、国内外の類似火山のデータを元に作成する方法を考えることも解決策の1つと思われる。

事象の出現頻度から単純に確率を計算するだけでは、実際の噴火に対応することは難しい。この問題の根底には、大規模噴火と小規模噴火との間に本質的なギャップがあり、ただ単に小規模噴火が大きくなったものが大規模噴火ではないという可能性があるからである。小規模噴火と大規模噴火との関係は、以下のような視点で検討することが有効かもしれない。たとえば九重火山などでは、数年か

ら数10年に1度程度の間隔で水蒸気爆発や噴気活動の異常が起き、数100年から数千年に1度程度の頻度で新しい火山体を形成する噴火が起きている。多くの火山の活動は、異常現象の後に噴火が容易に発生する「噴火卓越型」と、異常現象の後に地熱異常や水蒸気爆発が発生する「地熱活動卓越型」をエンドメンバーとして整理可能な多様性が見られる（鍵山，2008）。後者はマグマの上昇が途中で停止し、マグマ中の揮発性成分が地表まで上昇していると解釈が可能である。また、低頻度大規模噴火は、上昇停止によって地下にマグマが滞留するイベントを繰り返すうちに、地下深部から上昇してきたマグマが、滞留していたマグマに衝突することでトリガーがかかり、発生すると考える仮説が提案されている（鍵山，2010）。この仮説は、噴火履歴や観測事実によって検証する必要がある。

火山研究者は、噴火履歴の調査によって噴火の規模と発生年代を明らかにしている。階段ダイアグラムからは、平均的な噴出率や将来発生する噴火の規模を予測することも試みられている。しかしながら、この階段ダイアグラムから直接に小規模噴火と大規模噴火との関係を説明する知見は得られない。個々の噴火に関する情報、特に供給されたマグマどうしの関係が明らかになれば、大規模噴火の準備過程と小規模噴火の準備過程の違いを検証できるかもしれない。また、低頻度大規模噴火と高頻度小規模噴火の関係は、階段ダイアグラムでは小刻みな階段になるか大きな階段になるかの問題に集約される。噴火の規模や噴火年代についての情報が十分に蓄積されて検討が行われれば、階段の刻みは、「時間的にあまり変動せず、火山によって固有の値がある」のか、あるいは「時間的に変動するが、その変動になんらかの規則性が見られる」、「時間的に変動し、かつランダムに変動する」などといった結論を得ることができると思われる。たとえば、上記の桜島で十分なデータがそろえられれば、大きな階段の後の30年間は小刻みな階段が続き、その後大きな階段が見られるのかもしれない。

マグマの上昇停止に関する情報を集めることも重要である。この情報は、実際に活動している火山における観測・調査が効果的であろう。マグマの上昇停止が起きている深さや揮発性成分のマグマからの散逸を地震観測や火山ガス観測、地下の電気伝導度調査から推定することなどが考えられる。また、噴出物の類質岩片と新鮮なマグマ由来物質との比、噴出物の発泡度、包有物からの情報なども有効と思われる。噴火未遂と地熱活動の間には密接な関係がありうるので、地熱活動に関する情報整理も有益と思われる。

桜島火山は近年活発な噴火活動を続けており、作成した噴火シナリオをリアルタイムに使用してその精度や問題点を確認することで完成度を高めていくことが重要であろう。霧島新燃岳へのシナリオの試用は、系統樹を目の前において観測された資料を検討することで、現象の分岐を明確に意識した議論が行われ、また不足している情報が何であるか洗い出す効果があった。加えて、防災関係者・報道関係者とも意識を共有する効果があったと思われる。近い将来に、予知計画で作成している噴火シナリオを他の火山でも作成できるように、マニュアル的なものを、この予知研究において作成することが重要である。そのようなマニュアルを用いて、本研究の担当者以外の火山専門家が、対象火山について噴火シナリオを作成できる状況を作ることが好ましい。

## 成果リスト

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.

鍵山恒臣・中田節也・井口正人, 2012, 噴火予測における噴火シナリオの役割と課題, 月刊地球, 34, 318-321.

Terada, A., Hashimoto, T. and Kagiya, T., 2012, A water flow model of the active crater lake at Aso volcano, Japan: Fluctuations of magmatic gas and groundwater fluxes from the underlying hydrothermal system, Bull. Volcanol., DOI: 10.1007/s00445-011-0550-4

Terada, A., Sudo, Y., 2012, Thermal activity within the western-slope geothermal zone of Aso volcano,

Japan:Development of a new thermal area. Geothermics, doi:10.1016/j.geothermics.2012.01.003

寺田暁彦・吉川 慎・大島弘光・前川徳光・松島喜雄, 2012, 空中赤外観測に基づく噴気地および火口湖面の放熱量推定 - 有珠火山・登別火山・北海道駒ヶ岳火山 -, 北海道大学地球物理学研究報告, 印刷中.

津久井雅史, 2011, 浅間火山天明噴火：遠隔地の史料から明らかになった降灰分布と活動推移, 火山2集, 56, 65-87.

津久井雅史, 2011, 史料にもとづく桜島火山1779年安永噴火の降灰分布, 火山2集, 56, 89-94.

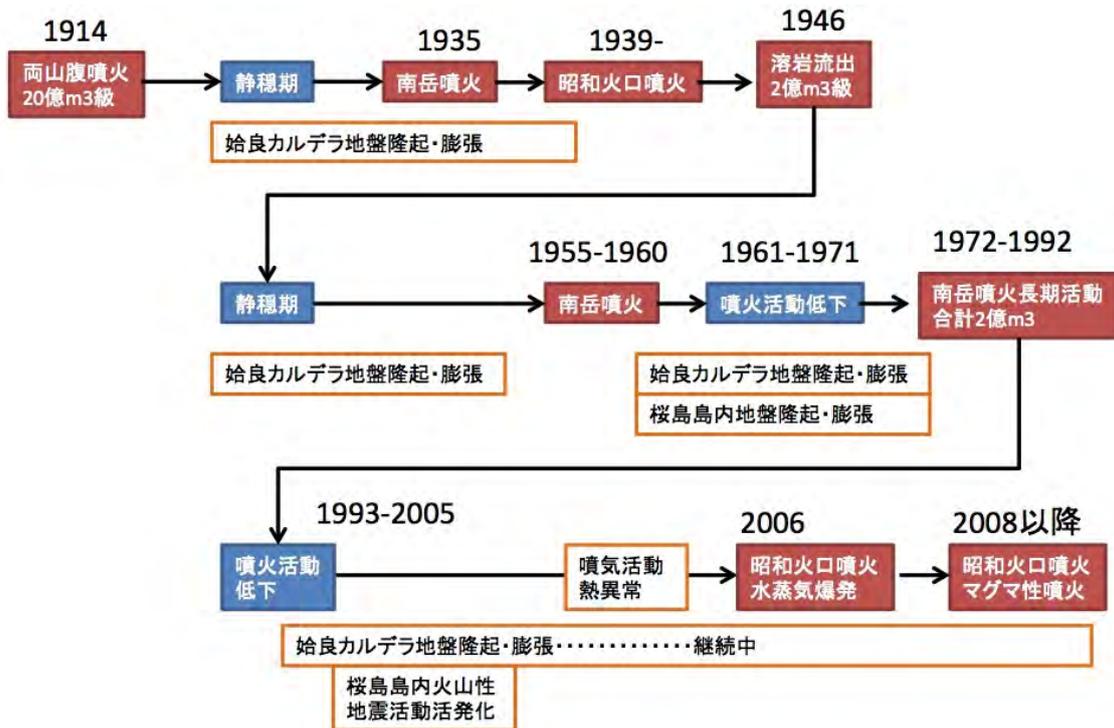


図1. 桜島大正噴火以降の活動の推移（東京大学地震研究所 [課題番号：1407]）  
大正噴火以降約30年周期で大きなイベントが起こっており、それぞれの噴出量は $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ である。

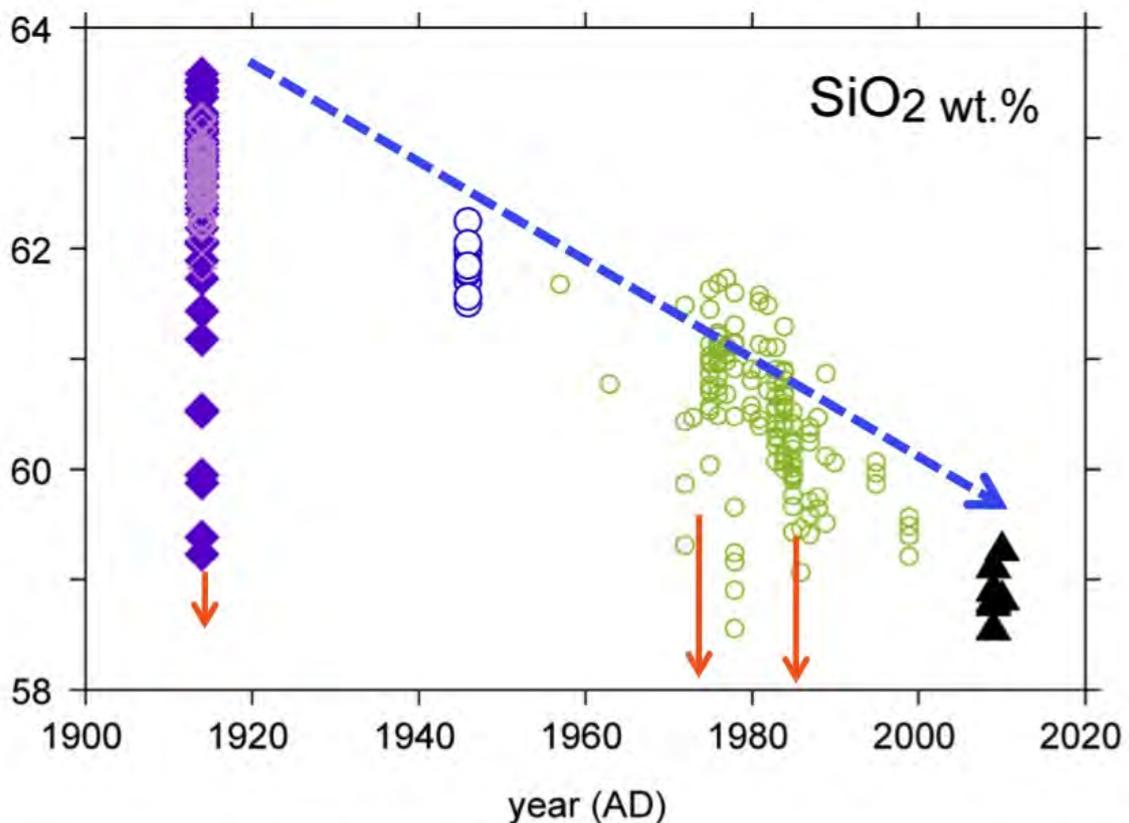


図2. 桜島火山における火山噴出物中マグマ物質のSiO<sub>2</sub>量の時間変化（東京大学地震研究所 [課題番号：1407]）大正噴火後、マグマの組成は玄武岩質マグマの関与によって次第に苦鉄質になっている。それぞれの噴火において玄武岩質マグマの関与が本質的であると理解される。

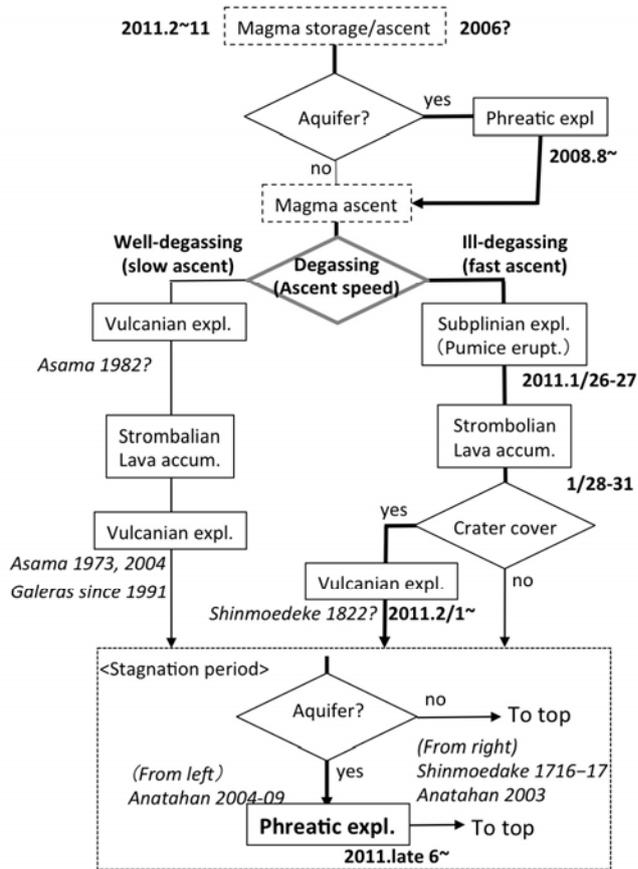


図3. 新燃岳の噴火シナリオ第3版（東京大学地震研究所 [課題番号：1408]）

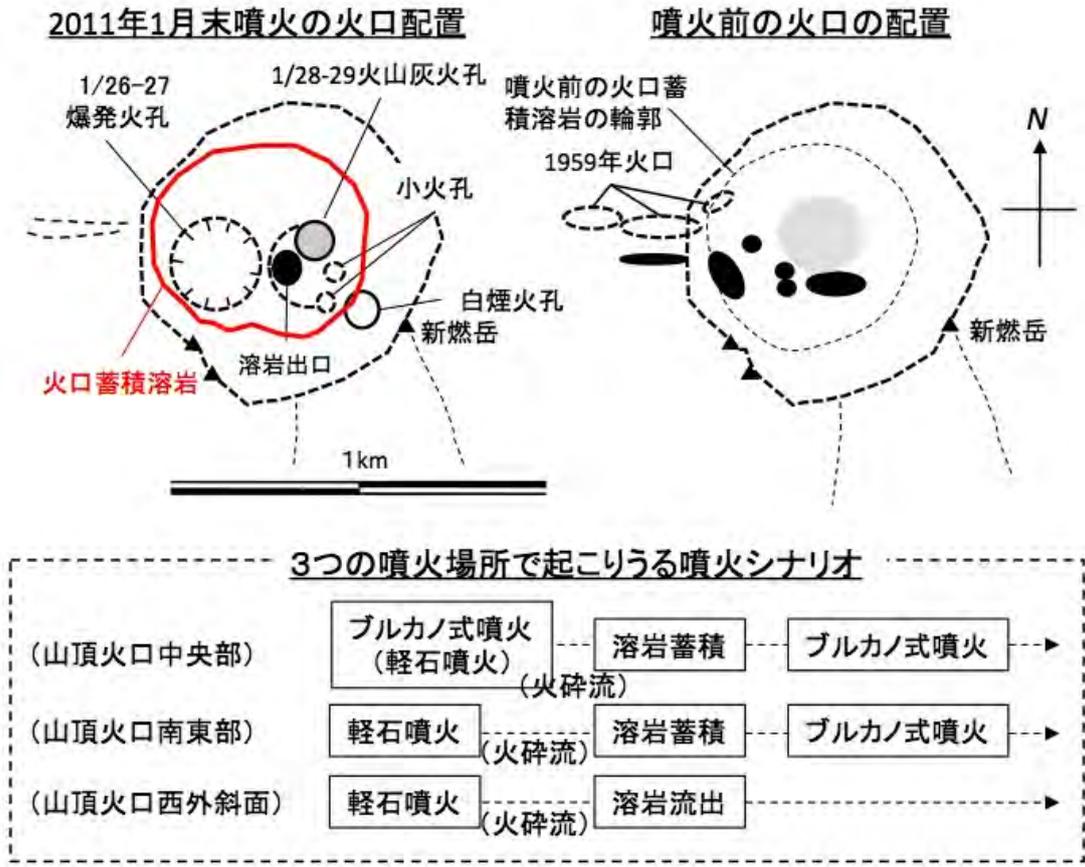
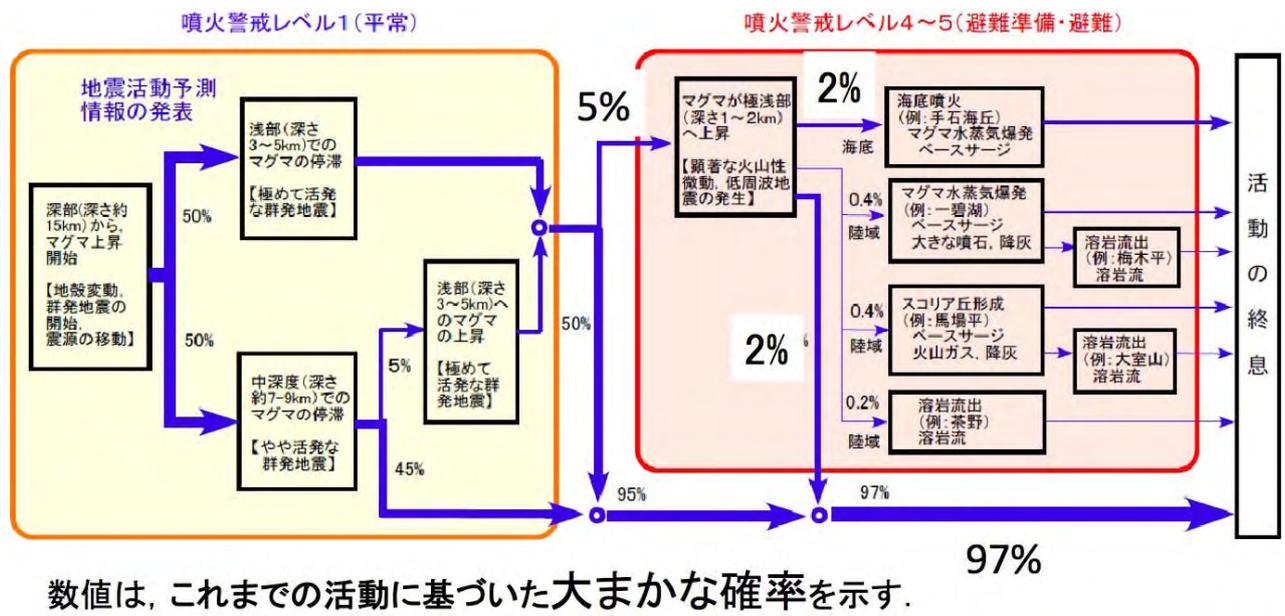


図4. 新燃岳の2011年噴火前後の火口分布図（上）と噴火位置を考慮した噴火様式と推移（下）（東京大学地震研究所〔課題番号：1408〕）



数値は、これまでの活動に基づいた大まかな確率を示す。

図5. 東伊豆火山の噴火シナリオ（群発地震発生時の噴火事象分岐図）（東京大学地震研究所〔課題番号：1408〕）