

シンポジウム

「火山噴火の中長期的予測に向けた研究の現状と今後の課題」

[要旨集]

令和4年12月23日(土)
オンライン (Zoom Webinar)

主催:地震・火山噴火予知研究協議会 火山計画推進部会

プログラム

9:30～9:40 開会にあたっての事務連絡

講演第1部(本会の開催背景, 趣旨説明, これまでの火山活動性評価の代表事例) …… 予稿集頁

- ① 9:40～9:50 西村太志(東北大学) 内閣府火山防災および予知協議会
- ② 9:50～10:00 前野 深(東京大学) 内閣府技術動向 WG における検討内容の紹介
- ③ 10:00～10:10 藤田英輔(防災科学技術研究所)文科PJにおける中長期予測に資する研究
— 特に防災科研による総合的火山活動評価

④ 10:10～10:35 高木朗充(気象研究所)気象庁による日本の活火山のランク分け …… 3-7

講演第2部(地質学的手法, 特に階段図を利用したマグマ噴火の傾向と噴火可能性評価)

- ⑤ 10:35～11:00 小山真人(静岡大学)階段図形状の意味と将来予測性 …… 8-16
- ⑥ 11:00～11:25 中川光弘(北海道大学)文科省「次世代火山研究人材育成総合プロジェクト」
で進めている階段図作成とその活用 …… 17-18
- ⑦ 11:25～11:50 安井真也(日本大学)詳細な階段図の事例紹介と階段図の限界 …… 19-27

昼食休憩 (フラッシュトークを開催します)

12:00～12:40 1人あたり最長5分(ご要望のあった方から, 事務局で調整)

- ⑧ 12:40～12:50 三浦大助・奥野 充(大阪公立大)地質学的記録に基づく火山活動評価の高度化… 28-35
- ⑨ 12:50～13:00 安田 敦(東京大学)「噴火予測のための簡単なマグマ供給系モデル」の階段図
によるパラメータ推定 …… 36-42

講演第2部再開

- ⑩ 13:00～13:25 山元孝広(産業技術総合研究所)階段図(供給率変化)とマグマ供給系 …… 43-45
- ⑪ 13:25～13:40 伊藤順一(産業技術総合研究所)階段図を用いたマグマ活動の評価指標の提案… 46-57

講演第3部(地物・化学・物質科学的手法による噴火可能性評価)

- ⑫ 13:40～14:05 下司信夫(産業技術総合研究所)岩石・鉱物学的手法による中長期火山活動予測… 58-62
- ⑬ 14:05～14:30 森 俊哉(東京大学)火山性流体研究に基づく活動評価・予測 …… 63-69
- ⑭ 14:30～14:50 宗包浩志(国土地理院)地殻変動観測に基づく活動評価・予測 …… 70-75
- ⑮ 14:50～15:10 青山 裕(北海道大学)地震観測等の物理モニタリングに基づく活動評価・予測… 76-79
- ⑯ 15:10～15:30 橋本武志(北海道大学)地下構造探査を中長期の噴火可能性評価にどう使うか… 80-86

休憩

講演第4部(総合討論・パネルディスカッション)

15:45～17:30 講演者全員 …… 別添資料

気象庁による日本の活火山のランク分け

高木朗充¹

¹ 気象庁 気象研究所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1. Email: atakagi@mri-jma.go.jp

1. はじめに

活火山カタログなど、火山に関する基礎資料を整備することは、火山災害の防止や軽減のための施策を検討するため、あるいは火山研究を推進するために必要不可欠である。火山噴火予知連絡会が昭和48年(1973年)に気象庁に設置されて以来、その任務のひとつとして活火山カタログの整備を進めてきた。

かつては、わが国の活火山の定義は、「過去およそ2000年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動の火山」とされていた。しかしながら、火山学の進展等により、過去1万年の噴火履歴で活火山を定義するのが適当であるとの認識が国際的にも一般的になりつつあった(Simkin and Siebert, 1994)ことなどから、火山噴火予知連絡会では、活火山ワーキンググループを1999年に設置し、活火山の定義について検討を開始した。さらに、火山に対する施策について総合的に検討するため手がかりを与えるための指標として、活火山を火山活動度に基づいてランク分けすることを検討した。

ワーキンググループで検討を重ね、2003年、火山噴火予知連絡会は「概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」を活火山と定義することとし、活火山の数を86から108に増やした。一方で、それによって活動度が多様な火山が活火山になり、それぞれの火山の活発さを示す何らかの指標が必要と考え、火山学的に評価した中長期的な活動度に基づいて、活火山を活動度の高い順にA, B, Cの3ランクに分類した(気象庁, 2003)。

しかし、このランク分けは過去の火山活動度に基づいており、必ずしも噴火の切迫性を反映したものではないこと、社会的な影響について評価したものではなく、そのまま防災上の対応の必要度に当てはめられるものではなかったことから、2007年から、火山噴火予知連絡会は、火山防災対策の充実を図るべき火山の選定作業を行い、およそ100年程度の中長期的な噴火の可能性を評価して、社会的な影響も考慮した上で、火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある火山として、2009年に47火山を選定した(2023年現在、常時観測火山は50)。それは、気象庁の常時監視体制もその選定に基づくものとなって現在に至っている。なお、新たな視点で要注意火山が選定されたことや、47火山の中には2003年時点ではランクCとされた火山も多く含まれていることから、現在は気象庁ではランクは使用していない(山里・他, 2013)。

気象庁では2007年に気象業務法を一部改正し、噴火警報発表の業務を開始するとともに、噴火警戒レベルを導入した(気象庁, 2007)。噴火警戒レベルとは、噴火規模の大小によらず、火山周辺地域において、「警戒が必要な範囲」とそれに応じて「とるべき防災対応」を5段階に区分して発表する指

標である。このように、噴火警戒レベルは居住区域等の社会的な要因も考慮する一方、活火山のランク分けは、火山噴火予知に関する研究や観測体制の整備のための施策について総合的に検討するために、過去の活動をもとに火山学的に評価された中長期的な活動を示す指標だったという点で大きく異なる。

本稿では、「火山噴火の中長期的予測に向けた研究の現状と今後の課題」を検討するにあたり、2003年に火山噴火予知連絡会で提示した活火山の分類についてあらためて紹介するとともに、その後20年が経過した現時点で、同手法を用いて改めて評価した結果の一部を示すとともに、中長期的な噴火の可能性の評価手法を開発する対象火山のありかたについて述べる。

2. 過去の火山活動度に基づく活火山の分類(ランク分け)

火山活動について、過去1万年に地層に残るような規模の大きい噴火履歴(活動頻度、噴火規模、活動様式)に基づく1万年活動度指数、及び過去100年間に収集されたデータに基づく100年活動度指数を提示した上で、以下の3種類に分類する。

ランクA:100年活動度指数(5を超える)あるいは、1万年活動度指数(10を超える)が特に高い火山

ランクB:100年活動度指数(1を超える)あるいは、1万年活動度指数(7を超える)が高い火山(ランクAを除く)

ランクC:いずれの活動度指数も低い火山(ランクA, B以外の火山)

1万年活動度指数と100年活動度指数について、および手法の詳細は林・宇平(2008)を参照されたい。

この手法による、100年活動度指数と1万年活動度指数による分類は、図1Aのとおりであり、2002年時点で提示された活火山のランク分けは以下のとおりであった。

・ランクAの火山:13

十勝岳, 樽前山, 有珠山, 北海道駒ヶ岳, 浅間山, 伊豆大島, 三宅島, 伊豆鳥島, 阿蘇山, 雲仙岳, 桜島, 薩摩硫黄島, 諏訪之瀬島

・ランクBの火山:36

知床硫黄山, 羅臼岳, 摩周, 雌阿寒岳, 恵山, 渡島大島, 岩木山, 十和田, 秋田焼山, 岩手山, 秋田駒ヶ岳, 鳥海山, 栗駒山, 蔵王山, 吾妻山, 安達太良山, 磐梯山, 那須岳, 榛名山, 草津白根山, 新湯焼山, 焼岳, 御嶽山, 富士山, 箱根山, 伊豆東部火山群, 新島, 神津島, 西之島, 硫黄島, 鶴見岳・伽藍岳, 九重山, 霧島山, 口永良部島, 中之島, 硫黄鳥島

・ランクCの火山:36

アトサヌプリ, 丸山, 大雪山, 利尻山, 恵庭岳, 倶多楽, 羊蹄山, ニセコ, 恐山, 八甲田山, 八幡平, 鳴子, 肘折, 沼沢, 燧ヶ岳, 高原山, 日光白根山, 赤城山, 横岳, 妙高山, 弥陀ヶ原, アカンダナ山, 乗鞍岳, 白山, 利島, 御蔵島, 八丈島, 青ヶ島, 三瓶山, 阿武火山群, 由布岳, 福江火山群, 米丸・住吉池, 池田・山川, 開聞岳, 口之島

(北方領土の火山, 海底火山を除く。なお、この時点では天頂山, 雄阿寒岳, 男体山は活火山と認定

されていない。)

3. 日本の活火山のランク分けの評価

3.1. ランク分け後の 20 年間の火山活動

火山噴火予知連絡会によって検討された活火山のランク分けを公表して 20 年が経過した。ランク分け後に、いくつかの火山で活発な噴火活動がみられた。2003 年当時に、中長期的な火山活動評価の視点で行った分類結果を、その後の 20 年の活動を振り返ることによる簡単な点検を行った。

ランク A の 13 火山のうち、その後の 20 年で噴火した火山は 7 火山であり、割合は 54%であった。ランク B の 36 火山のうち、その後の 20 年で噴火した火山は、9 火山で割合は 25%であった。ランク C の 36 火山のうち、その後の 20 年で噴火した火山はなかった。また、ランク分けの対象外となった海底火山では噴火が 1 回あった(福徳岡ノ場)。

3.2. 2023 年時点におけるランク分け

2003 年のランク分け後、20 年経過した 2023 年時点で、改めてランク分けを行った。試算したのは、近年、火山活動が高まった御嶽山、箱根山、西之島、霧島山、口永良部島の 5 火山であり、2003 年ランク分けと同様の手順で 100 年活動指標及び 1 万年活動指標を求め、ランクを確認した。

これら 5 火山は 2003 年のランク分けではいずれもランク B であった(第 1 図 A)。2023 年時点では、いずれも活動度指数が大きくなり(第 1 図 B)、これらのうち西之島と霧島山ではランク A となった。御嶽山、箱根山及び口永良部島はランク B と変わらなかったが、口永良部島はランク A との境界に近い活動度指数となった。

4. 活火山のランク分けと、中長期的な噴火の可能性の評価研究の対象火山

前章の結果によると、ランク A とした火山では、その後の 20 年間で半分以上(7/13)が噴火したと、またランク C とした火山では、その後の 20 年間で噴火がなかったことから、2003 年時点での中長期的な評価は概ね妥当だったと考える。また、近年火山活動が高まったと感じられる 5 火山(いずれも 2003 年当時はランク B)を 2023 年時点で改めてランク分けしたところ、西之島と霧島山がランク A と評価されたが、これらはいずれもマグマ噴火を断続的に起こしている火山である。2003 年以降の口永良部島噴火はマグマ噴火ではなかったものの、長期にわたって火山活動が高い状態が継続している。

今後、中長期的な噴火の可能性の評価手法の開発に着手するのであれば、研究が効果的・効率的に進捗するような火山を選考して取り組むことが望まれる。たとえば、同様の選考を 20 年前に行っていた場合、ランク B であった霧島山や西之島を選考できていただろうか。このランク分け手法は概ね妥当であったと結論付けたものの、結果的には活発なマグマ噴火の活動期に入った西之島や霧島山のような火山を中長期的な活動度としては一段低く見ていたことになる。中長期的な噴火の可能性の評価研究の対象火山を選考するためには、今後、さらなる工夫が必要である。

引用文献

林 豊・宇平幸一（2008）最近一万年間の火山活動に基づく火山活動度指数による日本の活火山のランク分けについて. 験震時報, **71**, 59-78.

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol71p059.pdf>

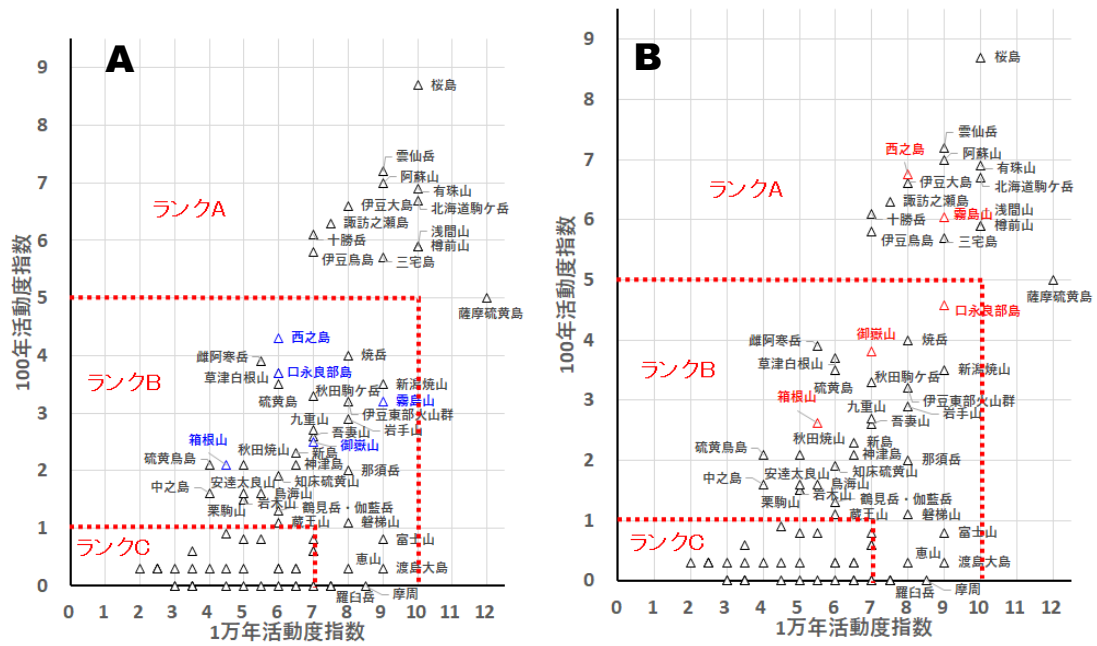
気象庁（2003）火山噴火予知連絡会による活火山の選定及び火山活動度による分類(ランク分け)について(報道発表資料). <https://www.jma.go.jp/jma/press/0301/21a/yochiren.pdf>

気象庁（2007）12月1日から噴火警報, 噴火警戒レベルを発表します(報道発表資料).

<https://www.jma.go.jp/jma/press/0711/30a/071130.html>

Simkin, T. and Siebert, L. (1994) *Volcanoes of the World Second Edition*, Geosciences Press, Tucson AZ, 349p.

山里 平・舟崎 淳・高木康伸（2013）気象庁の火山防災業務. 防災科学技術研究所研究資料, **380**, 9-15. <https://kazan.bosai.go.jp/v-hazard/pdf/03.pdf>



第 1 図 活火山のランク分け

A: 2003 年時点での結果。データ出典は林・宇平 (2008) に基づく。 B: 御嶽山, 箱根山, 西之島, 霧島山及び口永良部島の 5 火山について, 2023 年時点で改めて試算した結果。

階段図形状の意味と将来予測性

小山真人¹

¹ 静岡大学防災総合センター

〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836. Email: koyama.masato@shizuoka.ac.jp

1. はじめに

いわゆる「階段図」は、火山の長期的な噴出量の時間変化を表すグラフで、横軸に時間、縦軸に積算噴出量をとる。多くの火山は長い噴火休止期間をもつため、このグラフは時間経過とともに右上がりの階段状を示すことが多く、階段図と通称される。小山・吉田(1994)は、当時入手できた国内外の火山の階段図を4種(時間予測型、噴出量予測型、完全周期型、不規則型)に分類し、それぞれの形状がもつ意味を考察した。その後も多くの火山の階段図が次々と公表され、国内火山のものは山元(2015)に集大成されている。本講演では、小山・吉田(1994)の分類と考察を簡単に振り返るとともに、階段図の大部分を占める不規則型の成因を整理・補足し、階段図から何らかの意味や予測を引き出すために必要な調査・観測の条件や方法についても考える。

2. 階段図の分類

小山・吉田(1994)に従い、階段図上で噴火が始まった時を示す点(階段の各ステップの下端部)を噴火開始点、噴火が終了し噴火休止期間が始まった時を示す点(階段の各ステップの上端部)を噴火終了点と呼ぶことにする(第1図)。

時間予測型の階段図は、噴火開始点が直線に沿って並ぶ。噴火休止期間の長さがそれに先立つ噴火の噴出量に比例するため、ひとつ前の噴火の噴出量によって規定された休止期間が過ぎれば、必ず次の噴火を生じる。つまり、次の噴火時期が予測できる。

噴出量予測型の階段図は、噴火終了点が直線に沿って並ぶ。噴火の噴出量がそれに先立つ休止期間の長さに比例するため、休止期間の長さに応じた量のマグマを噴出すれば、必ず噴火が終わる。つまり、噴火が始まった時点で、その噴火の総噴出量が予測できる。

完全周期型の階段図は、噴火開始点と噴火終了点の両方が傾きの等しい2本の直線に沿って並ぶため、噴出量と噴火休止期間の長さがいつも等しい。つまり、次の噴火の時期と噴出量の両方が予測できる。

不規則型の階段図は、噴火開始点と噴火終了点の両方の配列がこれといった規則性をもたないため、次の噴火の時期と噴出量のどちらも予測が困難である。

3. 階段図を説明するモデル

小山・吉田(1994)は、マグマ供給系に関する単純なモデル(第2図)を仮定することで、不規則型以

外の階段図3種の形状が説明可能なことを示した。その要点を以下にまとめる。詳細は小山・吉田(1994)や小山(2008)を参照してほしい。

第2図において、マグマだまり出口付近の静水圧と浮力の合力を上昇圧 P_m とする。噴火休止期間にはマグマだまりから地表への通路が閉じており、 P_m は地下深部からのマグマ供給やマグマ物性・組成のゆるやかな変化によって一様に増加してゆく(第3図の仮定1)。 P_m が閉塞した火道の破壊強度とつりあう上限値 P_0 を超えた時点で通路が開いて噴火が始まる。噴火終了後に P_m は減少し、その量は噴出量に比例すると仮定する(第3図の仮定2)。

3.1. 時間予測型

ここで P_0 が不変であり、かつ P_m 降下量が噴火のたびに異なるとすれば、 P_m の降下量が大きいほど次の噴火までの休止期間が長くなり、階段図は時間予測型となる(第3図A)。 P_m 降下量が噴火のたびに異なるのは、噴火毎に噴火終了条件が異なることを意味する。

3.2. 噴出量予測型

次に、噴火後の P_m 降下の下限值 P_1 が存在し、噴火後はいつも必ず P_m が P_1 まで降下するモデルを考える。 P_1 が不変であり、 P_0 が噴火のたびに異なるとすれば、 P_0 が大きい時ほど噴火に至るまでの休止期間は長くなり、結果として次の噴火の噴出量は大きくなる。このため、階段図は噴出量予測型となる(第3図B)。

P_1 一定は、噴火終了条件がいつも一定であることを意味する。一方、 P_0 の変動の原因として考えやすいのは、閉塞した火道の破壊強度の変動である。破壊強度変化の原因として、閉塞の程度が噴火毎に異なる、地殻応力場の変化(次節)、の2つが考えられる。

3.3. 完全周期型

P_0 と P_1 がいつも一定、すなわち噴火開始・終了条件の両方がいつも同じであれば、噴出量と休止期間の長さはいつも一定の関係になり、階段図は完全周期型となる(第3図C)。

4. 「不規則型」の成因

山元(2015)の階段図カタログを見てわかる通り、実際の火山の階段図には不規則型に分類すべきものが多い。階段図が不規則な形状を示す原因として、(1)噴火年代・噴出量の推定誤差、(2)貫入事件あるいはドレインバックの影響、(3)マグマだまり内マグマの物性・組成の変化、(4)地下深部からのマグマ供給率の変化、(5)マグマ供給系の構造変化、(6)性質の異なる小規模噴火の存在、(7)地殻応力場の変化、の7つが考えられる。

(1) 噴火年代・噴出量の推定誤差

小山・吉田(1994)はあえて踏み込むのを避けたが、実際の噴火年代(とくに地質時代の年代)と噴出

量には大きな推定誤差が含まれることが多い。広域拡散した降下テフラの噴出量については間接的な推定手法しかないため、もともと推定誤差が大きい。また、火砕流や溶岩流であっても、分布域に海域を含む場合や、浸食や陥没による大きな削剥が見込まれる場合の正確な噴出量推定は困難である。そうした事情もあってか、誤差を表現している階段図はわずかである。

さらに注意すべきは、階段図においては推定誤差が時間とともに累積するため、結果として階段図の全体形状と長期的な噴出率が大きく変化しうる点である(第4図)。階段図に何らかの規則性が見えたとしても、それが誤差累積による見かけ上のものか否かを注意深く吟味すべきである。

(2) 貫入事件とドレインバック

貫入事件が起きるとマグマの一部がマグマだまり中から失われることになり、この意味で貫入事件は噴火と等価である。噴火をとまなう、あるいは噴火に至らない貫入事件は、多くの火山で起きているとみられる。伊豆大島火山の1986年割れ目噴火や伊豆東部火山群の1989年手石海丘の噴火は噴火をとまなう貫入事件、また手石海丘噴火以外の1978年以来の伊豆東部火山群の地殻活動は噴火に至らない貫入事件の例である。伊豆東部火山群の噴出量階段図が不規則型であること(小山, 2010)は、貫入事件が火山活動の主体となっているためと考えられる。

ドレインバックは、いったん火口直下あるいは地表にまで噴出したマグマが、噴火終了後にマグマだまりに戻ってしまう現象であり、伊豆大島1986年噴火によって三原山火口内を満たした溶岩が1987年噴火とともにマグマだまりに逆流した事件などで実際に観測されている。よって、階段図を描く際にはドレインバック量を噴出量としてカウントしない取り扱いが必要である。

しかしながら、これまで貫入事件やドレインバックを考慮した階段図はほとんど描かれていないため、実際には規則性があっても見かけ上は不規則型となってしまった例が多数あるとみられる。伊豆東部火山群の地震回数と歪み変化量の階段図は、時間予測型に適合するとの報告がある(青木, 1999)。地震回数と歪み変化量が貫入事件の規模に相当すると考えれば、不規則型に分類されてきた伊豆東部火山群の貫入分もふくむ階段図は時間予測型が本来の形なのかもしれない。

(3) マグマだまり内マグマの物性・組成の変化

一般に、噴火休止期間中のマグマだまり内では温度低下や結晶分化作用が進行するとともにマグマの粘性が変化し、マグマだまりの上部には揮発性成分が濃集する。このような過程に何らかの非定常的变化が生じた場合、あるいは定常的变化が何らかのしきい値に達した場合、噴出量におよぼす影響が大となり、結果として階段図の形状に不連続的な変化が生じるかもしれない。たとえば、マグマの粘性がある限界以上に大きくなった場合には本来噴出すべき量のマグマが噴出せず、階段図の形状が変化するだろう。

(4) 地下深部からのマグマ供給率の変化

富士火山の階段図(山元, 2015)をみると、1万7000年前～8000年前の噴出量がとりわけ大きく、階

階段図の不規則な形状を特徴づけている。この時期の岩石はそれ以前の岩石に比べて未分化な組成をもつことから、この時期に地下深部から新たに未分化マグマが大量に供給され、噴出量が大きくなったと考えられている(高橋ほか, 1991)。このように地下深部からのマグマ供給率の変化は、階段図を不規則にする要因のひとつと考えられる。

なお, Yamamoto *et al.* (2018) は, 日本のいくつかの火山についてマグマの組成変化や深部からの供給率変化にともなう階段図の形状や傾きの変化について議論している。

(5) マグマ供給系の構造変化

マグマだまりの冷却やカルデラ形成などにもなってマグマ供給系の内部構造が大きく変化する場合には、階段図の形状も変化する可能性があるだろう。小山・吉田(1994)は、十和田火山の階段図を噴出量予測型に分類し、そのカルデラ形成期終了後の傾き変化がこの事例に相当する可能性を議論した。しかし、その後改訂された階段図(工藤, 2023)を見ると、階段図の時間予測性や傾き変化は不明瞭であり、当初の階段図の特徴は見かけ上のものかもしれない。

(6) 性質の異なる小規模噴火

階段図が時間予測・噴出量予測・完全周期のいずれかの型に当てはまるようにみえる場合にも、階段図の大局的な形状に影響を与えない程度の規模の噴火が存在する場合がある。このような噴火は、予測直線上にのる噴火とは性質の異なる噴火かもしれない。たとえば、伊豆大島火山の噴火は、テフラ噴出量階段図上において噴出量予測性を示す大規模噴火と、そうでない中～小規模噴火とに分けることができ、両者は規模だけでなく噴火の性質も異にしている(小山・早川, 1996)。

(7) 地殻応力場の影響

第2図において、地殻応力場の変化が P_m や P_0 を上下させた場合、結果として階段図の形状が変化する(小山・吉田, 1994)。具体的には、(1)マグマだまり内マグマの静水圧や浮力の変化によって P_m が変化する、(2)閉塞した火道の破壊強度の変化によって P_0 が変化する、の2つが考えられる。

(1)において P_m が増加する場合には次の噴火時期が早められ、その時点以降の階段図は、時間予測・噴出量予測・完全周期のいずれの型においても上方にシフトする(第5図A)。また、 P_m が減少する場合には次の噴火時期が遅められ、その時点以降の階段図は下方にシフトする(第5図B)。(2)においては、ベースとなる型によって階段図の形状変化が異なり、さらに地殻応力場の変化が火道の開口を手助けして P_0 が下降する場合と、火道の開口を妨げて P_0 が上昇する場合とで、階段図のシフトの方向も異なる(第5図C～D)。なお、こうした地殻応力場の変化による階段図シフトの実例とみられる現象が、アラスカのPavlof火山で報告されている(McNutt and Beavan, 1987)。

5. どのような観測・調査をすべきか

前節の議論からわかるように、階段図の大半を占める不規則型の形状は、多種の原因が絡み合った

結果であることが推察される。それらを解きほぐすのは一筋縄では行かないが、逆に考えれば不規則型の形状を読み解くことこそが、次回の噴火時期や噴出量の精度の高い予測につながると言えよう。

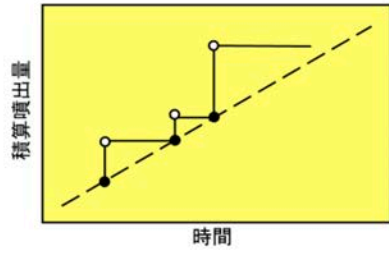
不規則型の階段図を読み解くためには、噴火年代と噴出量をできる限り正確に測定すること、噴出したマグマの特徴からマグマ供給系の内部で生じた変化を探ることに加え、精密な地殻変動観測によってマグマの貫入量やドレインバック量を知ることが必須である。これによって貫入量やドレインバック量も含めた(真の)階段図を描き、マグマ供給系の内部で生じた変化や地殻応力場の影響を考慮しながら階段図形状の意味を正確に解釈することによって、次の噴火の時期と噴出量をある程度予測することが可能となるだろう。

こうした研究の実現条件は、(1)すみやかなデータ蓄積と実証を可能とする頻繁なマグマ噴火・貫入事件の発生履歴を有するとともに、それが今後も見込まれる火山において、(2)地表調査などによる噴出量の高精度推定、(3)噴出物の採取と物理・化学分析によるマグマ供給系の内部過程のモニタリング、(4)機器観測による貫入量・ドレインバック量・地殻応力場の高精度モニタリング、が実施可能な体制となっていることだろう。加えて(2)～(4)の実現のためには、アクセスが良くインフラの整った広い陸域をもつ火山を対象とすべきである。実際にハワイのキラウエア火山では、精密な観測データにもとづいて貫入量も考慮した階段図が描かれている(Dvorak and Dzurisin, 1993)。

引用文献

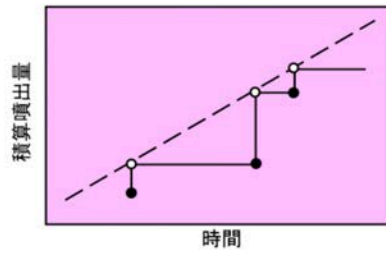
- 青木 元(1999)伊豆半島東方沖群発地震への時間予測モデルの適用について, 気象庁研究時報, **50**, 別冊, 124-125.
- Dvorak, J. J., and Dzurisin, D. (1993): Variation in magma supply rate at Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **98**, 22255-22268.
- 小山真人(2008)噴火の時期と噴出量を規定する要因. 火山の事典(第2版). 朝倉書店, 88-95.
- 小山真人(2010)伊豆の大地の物語. 静岡新聞社, 220-221.
- 小山真人・吉田 浩(1994)噴出量の累積変化からみた火山の噴火史と地殻応力場. 火山, **39**, 177-190.
- 小山真人・早川由紀夫(1996)伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史. 地学雑誌, 105, 133-162.
- 工藤 崇(2023)十和田火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査研究報告, **74**, 133-153.
- McNutt, S.R. and Beavan, R.J.(1987)Eruptions of Pavlof Volcano and their possible modulation by ocean load and tectonic stresses. *J. Geophys. Res.*, **92**, 11509-11523.
- 高橋正樹・長谷川有希絵・津久井雅志・根本靖彦(1991)富士火山におけるマグマ供給系の進化:全岩化学組成の視点から. 火山, **36**, 281-296.
- 山元孝広(2015)日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査総合センター研究資料集, no. 613.
- Yamamoto, T., Kudo T., and Ishizuka, O. (2018) Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan. *Earth Planets Space*, **70**:65.

時間予測 (Time-predictable) 型



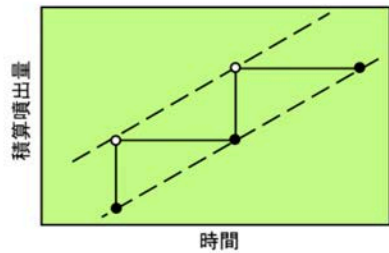
休止期間 = $k \times$ 直前の噴火の噴出量

噴出量予測 (Volume-predictable) 型



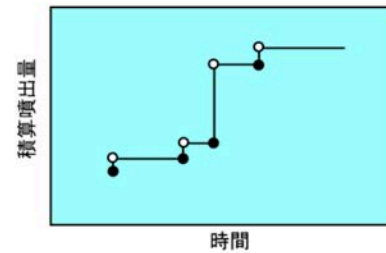
噴出量 = $k' \times$ 直前の休止期間の長さ

完全周期 (Strictly-periodic) 型



休止期間と噴出量がいつも同じ

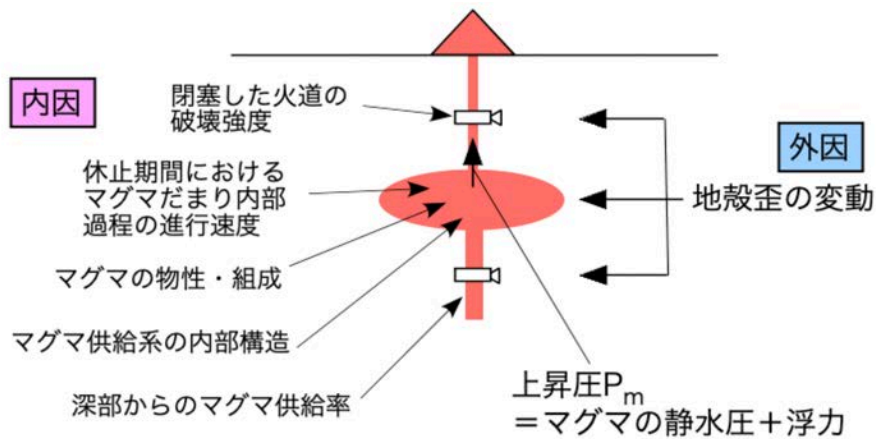
不規則 (Unpredictable) 型



休止期間と噴出量がいつも一定しない

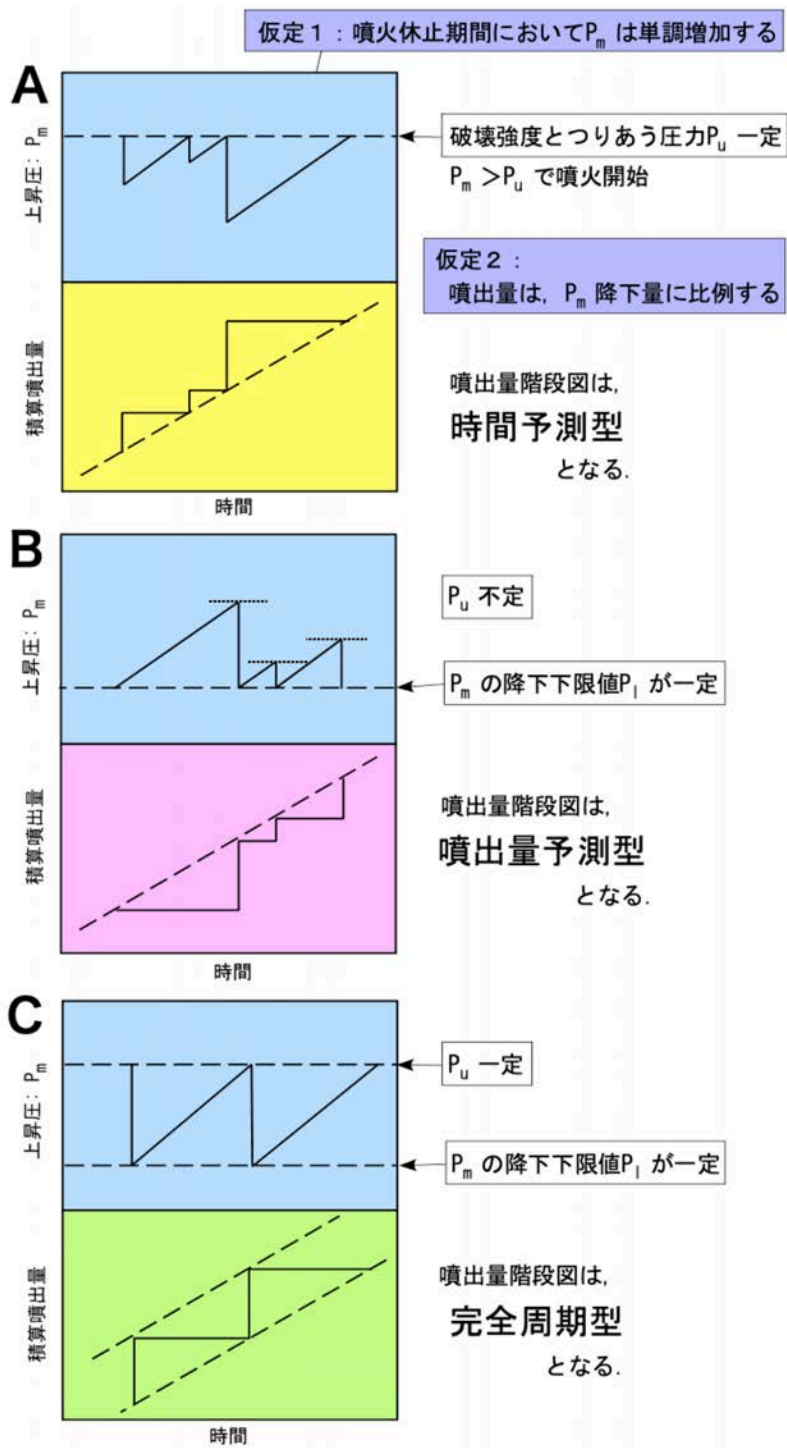
第 1 図 階段図の4つの型 (小山・吉田, 1994 に加筆・修正)

●: 噴火開始点, ○: 噴火終了点. k と k' はそれぞれの予測直線の傾き.

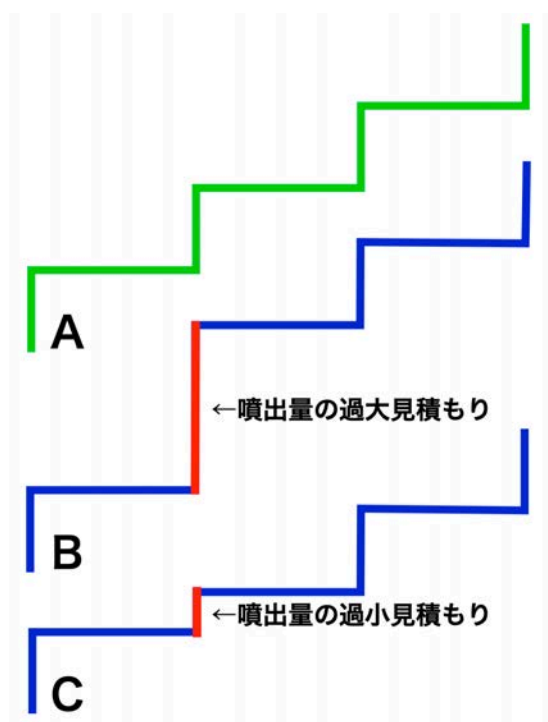


第 2 図 階段図の形状を説明するマグマ供給系のモデル (小山・吉田, 1994 に加筆)

マグマ供給系に影響を及ぼしうる内因と外因の候補も描いた.

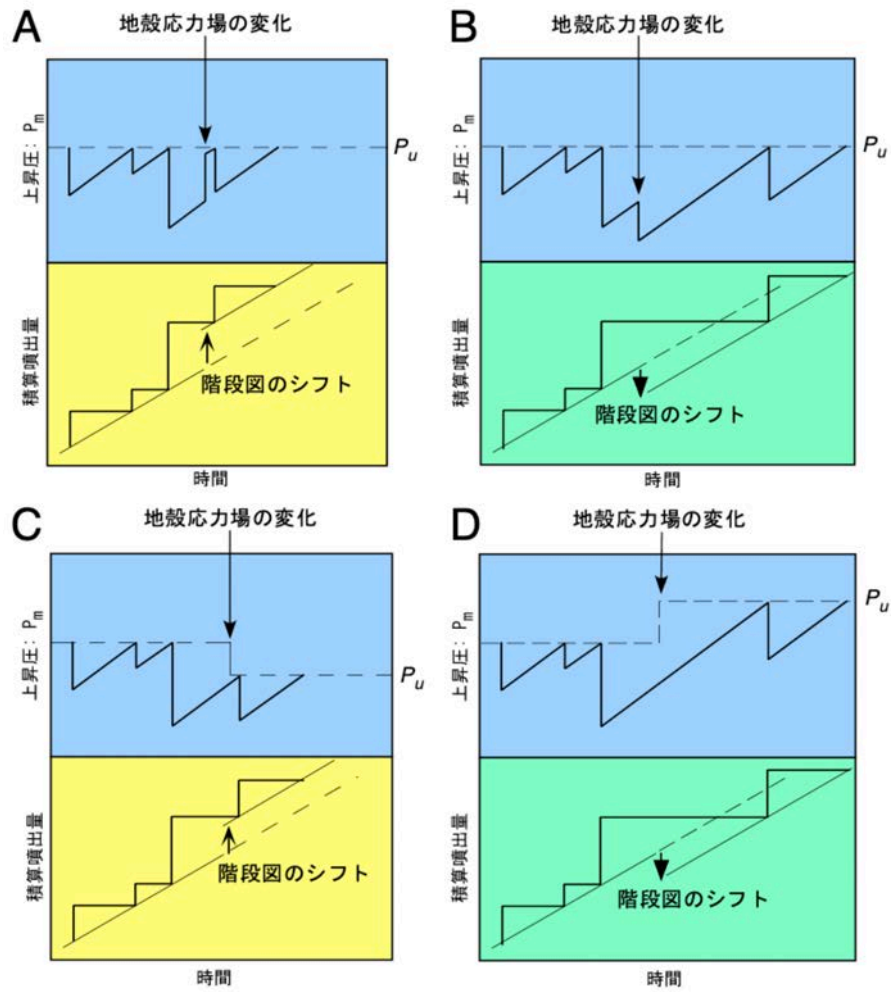


第3図 モデル(第2図)にもとづく階段図の形状の意味(小山・吉田, 1994 に加筆)



第 4 図 噴出量の推定誤差が階段図形状に与える影響の概念図

A:真の階段図(仮に完全周期型を仮定), B 噴出量の過大見積もり(赤線箇所)を含む階段図, C:噴出量の過小見積もり(赤線箇所)を含む階段図. ある噴火の推定噴出量が過大あるいは過小であった場合, 階段図全体の形状が変化して元の型が崩れるとともに, 長期的な噴出率の推定値も異なるものとなる.



第 5 図 地殻応力場の変化にともなう階段図のシフトの例(小山・吉田, 1994 にもとづく)

A: P_m が上昇する場合, B: P_m が下降する場合, C: P_u が下降する場合, D: P_u が上昇する場合, いずれも階段図が時間予測型の場合を描いた.

文科省プロジェクト「次世代火山研究人材育成総合プロジェクト」で進めている階段図作成とその活用

中川光弘¹

¹ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門地球惑星システム科学分野

〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 8 丁目 Email: mnakagawa@sci.hokudai.ac.jp

火山噴火の噴出量と噴火間隔の関係を示した噴出量階段図(以下, 階段図)は、個々の火山の噴火履歴を網羅的に示すことができ、火山の長期的な活動度を評価するために重要である。2016 年度から始まった次世代火山研究人材育成総合プロジェクトのサブ課題 C-2 では、「噴火履歴調査による火山噴火の中長期予測と噴火推移調査に基づく噴火事象系統樹の作成」というテーマで、国内の代表的な活動的火山において噴火履歴・様式と長期マグマ変遷を解明することにより、中長期噴火予測を行うとともに噴火事象系統樹の作成を目指している。その過程において、個々の火山の中長期の活動・噴火履歴を定量的に示すことができる階段図の作成を行うことが重要と考えている。そして将来の階段図の修正や改訂、あるいは複数の火山の比較検討などを行うためには、階段図だけではなく、統一された指針・手法に基づいて噴火に関するデータが収集されたデータベースの両方が完備される必要があるであろう。そしてそのデータベースと階段図がセットで公表されることで、研究者だけではなく、火山防災に係る自治体や民間企業などの関係者などが、広く利用できることが期待される。この観点から、サブ課題 C-2 の参加・協力機関から構成されるワーキンググループを立ち上げ、階段図の作成指針とそれに必要なデータの収集と解析手法、そしてそれに基づいたデータベースの構成について検討した。そして WG の指針に基づいた統一された様式の、データベースと階段図をセットで作成・公表することを決定した。今年度は、サブ課題 C-2 では各関係機関が担当する 13 の重点火山において階段図を作成し、それに用いたデータベースとセットで公表する。

サブ課題 C-2 の目的のひとつである、対象火山において中長期活動予測を行うためには、まず対象火山の全活動期間を対象とした階段図(長期階段図と呼ぶ)を作成し、その火山の噴火履歴を評価することが基本である。ある火山の長期的な活動履歴を見ると、噴火規模・様式・推移そしてマグマタイプは噴火毎に様々で、活動期によって大きく異なるのが一般的である。この変化は長期階段図において、その傾きの違いで表現される可能性がある。あるいは長期の休止期の存在と対応しているかもしれない。つまり長期の階段図により、ある火山の長期の噴出率変化に対応する活動期が定義できるであろう。その定義された活動期をもとに、噴出物を物質科学的に解析することにより、対象火山のマグマ供給系の変遷と噴火履歴との関係が議論できる。そして、マグマ供給系の現在の状況も推定できることになり、それによって中長期の活動予測が可能になると期待できる。

一方、噴火事象系統樹は対象火山で次の噴火が起こる場合に、どのような事象が起こりうるかを示したものであり、やはり過去の噴火事例をもとに作成するのが基本となる。噴火事象系統樹を作成する場合には、長期階段図では噴出率の変化や長期休止期の存在もあり、次に起こりうる噴火を考えるには問題が多いと考えられる。そのため、噴火事象系統樹を作成する場合には、現在に続く一定の噴出率を示す期間の噴火履歴に基づくのが妥当であろう。この期間の階段図を短期階段図と呼ぶ。短期階段図を作成することは、ある火山が現在、どのような活動期にあるかを認識することになる。そして、現在の活動期が今後も継続することを最重要の仮定として、短期階段図の活動期間における噴火履歴と噴火推移をもとに、噴火事象系統樹を作成することになる。

詳細な階段図の事例紹介と階段図の限界

安井真也¹

¹ 日本大学文理学部地球科学科

〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40. Email: yasui.maya@nihon-u.ac.jp

3. はじめに

さまざまな規模の噴火が過去にどのような時間スケールで起きたのか、個々の火山の実態を知ることとは重要であり、火山活動予測において階段図の活用が有望視されている。階段図の作成のために不可欠なのが地質学的データに基づく詳細な噴火履歴の復元であり、噴火でもたらされた堆積物の分布、層序、年代の調査が基本となる。ここでは階段図の作成事例として浅間前掛火山の1万年史を扱う。その活動は、様々な噴出形態の堆積物が明瞭な地質単位(地層)を残す大規模噴火と、個々の噴煙からは明瞭な地層が形成されない中小規模噴火(例:2004年噴火)に大別される。鬼押出溶岩を噴出した天明噴火(1783年)は有名だが、そのような大規模噴火の噴出物も古い時代のものは地下に埋積されるなど実態把握が難しい。中小規模噴火を含めた噴火履歴の復元、となるとさらに難易度が増す。ここでは噴火履歴復元と階段図の作成の過程で直面する様々な問題点と階段図の限界を明確にするとともに、今後中長期的に起こりうる噴火の可能性評価の手法についても考えてみたい。

2. 浅間前掛火山の大規模噴火の階段図作成

2.1 大規模噴火の堆積物の地質調査と高分解能噴火履歴復元の方法

火口近傍から山麓において堆積物の分布をおさえて層序を調べるのが基本となるが、地質学的手法で過去に遡る上で避けられないのが時代による情報量の違いである。一般に火口に近いほど新しい時代の堆積物が厚く、それらに覆われた古い時代の堆積物の観察の機会は極端に減る。深く切り込んだ谷の谷壁やボーリング掘削で古い堆積物が確認できたとしても、それを広範囲に追跡して分布の全貌を把握するのは難しい。例えば、2世紀噴火の小滝火砕流堆積物は、限られた地点での観察から北東方向の山麓の地下に分布することが予想されるが、その空間的拡がりや流下単位の数、降下火砕堆積物の降下単位との層位関係はわからない。つまり時代が古くなるほど単一の噴火イベントの識別も難しくなる。また分布の把握には、異なる地点間での堆積物の同定が必要だが、噴火イベント毎に特徴的な岩相や固有のマグマ組成を示すことは少ないため容易ではない。また噴煙由来の堆積物は噴火時の火口上空の風向の影響を受けて分布するが、火砕流や溶岩流は地形的高まりをよけて流下するため、調査地点により出現する堆積物に変化する。このため任意の地点の層序は噴火史の全貌を表さない。火砕流などの流れ堆積物が到達しない遠方では、古い時代まで降下火砕堆積物の層序を遡れる場合があるが、遠方に到達しない規模の噴火の痕跡はつかめない。

以上をふまえると、火山体近傍から遠方までの広範囲、かつ個々の地点では垂直方向にも緻密な

調査を行って総合的な層序を把握する必要がある。次の方法は総合的な層序の組立てに有効である。まず火山体近傍のできるだけ広範囲で掘削調査を実施して古い堆積物の記載を行う。多くの年代測定を行って地点間の対比や、分布方向の異なる堆積物間の層序の検討材料とする。降下火砕堆積物はできる限り等層厚線図を作成して分布を把握する。

前掛火山については長期の地表踏査に加えて、「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」により山頂火口の周囲 250 度以上の山麓において 30 ケ所の重機トレンチ掘削とボーリング掘削1ヶ所、約 140 試料の土壌や炭化木片試料の ^{14}C 年代測定を行ってきた。その検討結果を次に紹介する。

2.2 浅間前掛火山の大規模噴火の高分解能履歴復元

前掛火山の降下火砕堆積物に着目した場合、地質単位として軽石層を残すサブプリニー式噴火の規模は多様である。規模が大きく 50 km 以遠まで降下火砕堆積物が認識される Class 1 から火山体近傍の土壌中に軽石粒子が散在する産状の Class 4 まで分けられる(安井・他, 2021)。Class 1 と 2 は 16 cm と 64 cm の等層厚線が囲む面積に違いがある。年代が既知の As-A (18 世紀) と As-B と B (12 世紀) の他、As-C は 2 世紀, D グループは 3000~6000 年前頃, E グループは 6300 年前頃, As-F は 8300 年前頃の噴出と推定された。これらの年代と規模の関係を過去 1 万年間でみると、3000 年前頃までの第 I, II 活動期は Class 3, 4 が多いが、約 2000 年前以降の第 III 活動期は平均して 700 年に一度の低頻度で Class 1 の規模の噴火があったという定性的な噴火規模の変遷がみえてきた(第 1 図)。3000~6000 年前頃の第 II 活動期には、Class 3 の噴火が頻発したらしいことが特筆される。

2.3 大規模噴火の階段図作成と問題点

Takahashi *et al.* (2022) は復元された 1 万年史に基づいて、噴出量 (km^3DRE) と噴火年代の間の関係を示す階段図を試作した。第 2 図では規模の大きい A と小さい B (黒丸) に分けられている。活動期により噴出率は変化し、第 III 活動期の平均噴出率 ($0.0011\text{km}^3/\text{年}$) は、第 I 活動期 ($0.00006\text{km}^3/\text{年}$) および II ($0.0001\text{km}^3/\text{年}$) よりも 1 桁以上大きい。第 III 活動期以降は火砕流や溶岩流を伴う大規模サブプリニー式噴火が低頻度で起きている。図において第 III 活動期は噴出量予測型とみることができ、天明噴火クラスの大規模噴火が 2023 年に発生した場合、噴出量は約 0.21km^3 で天明噴火の半分以下と予測される。

このように、階段図から大規模噴火のマグマ噴出率の大局的な傾向をみることができる。ただし噴出物の体積見積りや、噴火年代の推定には不確実性が多く、このまま実用化できる段階にはない。特に問題なのは階段図に示される噴出量、噴火イベントの回数や噴火時期の情報の精度が、時代の新しい方と古い方とでは大きく異なる点である。

古い方の情報不足により最新の大規模噴火である天明噴火のデータを基準として比例配分をするなど、体積見積り時にかなり強引な仮定をおく必要があった(詳細は付録を参照)。当然ながら地下に埋積されている、あるいは侵食を受けた古い堆積物は体積が正確に見積もれない。降下火砕堆積物

について層厚の測定地点が限られる場合は、等層厚線の通過位置により体積見積りに大きな幅が生じる(例:第3図のAs-C)。また岩相や岩石学的性質が酷似する場合、地点間の対比が困難で、等層厚線図の作成を難しくする。古い時代の噴火の痕跡は見落とすこともあり得るため、噴火回数を決めるのも容易ではない。階段図の横軸(噴火年代)に関しても、天明噴火のように歴史記録が豊富な時代より前となると、現在の手法ではユニークに年代が決めにくい。As-C、Eグループ、As-Fの場合、それぞれについて7地点以上で測定したところ、軽石層直下の土壌の ^{14}C 年代は数100年程度の幅を示した(安井・他, 2021)。場所により圧密、生物擾乱、地下水などの影響が異なるためらしい。また個々の年代測定結果も校正暦年代には幅があり、任意の地点の一試料の年代測定結果がその堆積物をもたらした噴火の年代を表すかという問題が提起される。

3. 火山灰土壌に注目した浅間前掛火山における中小規模噴火の噴火史復元

3.1 中小規模噴火の活動記録

以上では大規模噴火についてみてきたが、中小規模の噴火も含めて噴火履歴の全貌を俯瞰する必要があろう。浅間火山の7世紀以降の活動記録をまとめた宮崎(2003)によると、天明噴火以降では19世紀の終わり頃から中小規模噴火が活発化した。明治44年(1911年)に本邦初の火山観測所が設置され、大森房吉博士が試験観測を始めた。その後1934年発足の東京大学浅間火山観測所で観測を行った水上(1935)は、噴火のエネルギーの大きい方から順にA~Dタイプに分けた。1935年以降の噴火記録にこの分類を付した宮崎(2003)からは、爆発を伴わず長時間火山灰の噴出を行うDタイプが最も多く観測され、爆発的なAタイプの頻度は低かったことがわかる。Takahashi *et al.*(2021)

は宮崎(2003)の記録に基づいて、5年以上噴火が連続し前後の休止期が2年以上の事例を“連続的噴火期”、あてはまらないものを“単発的噴火”とした(例:1973年や2004年噴火)。最近では1927-1956年が連続的噴火期にあたる。16世紀頃まで複数の連続的噴火期が推定されているが、20世紀以降と違い記録が少ない時代の情報量は当然落ちる。現時点では上記のような活動は階段図に反映させることは難しく、より古い時代についても地質学的に中小規模噴火を認識して、その性質を評価できるか、が次の焦点となる。

3.2 火山灰土壌から見た中小規模噴火の履歴

天明噴火以降無数の中小規模噴火があり、山麓の表層部には溶岩片を主とする火山灰粒子と腐植が混じった火山灰土壌の層(黒色土壌)が認められる。その層厚は平均16センチであるが、個々の噴火に対応する地層は識別できない。しかし同一地点でバルク試料として火山灰粒子の粒径や岩石組織などの垂直変化をみることで、中小規模噴火の活動度の評価ができる可能性はある。東南東麓(火口距離5.4km)のボーリングコア試料の深度約10メートルまでが前掛火山の時期に相当する。大規模噴火の軽石層の間に認められる火山灰土壌を2cm刻みで試料採取して分析を試みた。その結果、As-BとAs-C間とAs-Cの直下、As-Fの下位では黒色土壌の発達が顕著で、火山灰の含有量自体が少ないため、これらの時期は火山活動が不活発だったとみられる。Dグループの軽石層の間は火山

灰の径が他の深度より粗く、角張った溶岩片に富む。予察段階ではあるが、D グループの頃は長期間にわたり Class 3 や4の小規模なサブプリニー式噴火が断続する間、中小規模噴火も活発だったらしい。一方、DグループとAs-Bの間は2000年ほど中小規模噴火が不活発で、その間にAs-Cの大規模噴火が単発的に起きたようである。

しかし火山灰土壌のバルク試料を用いた分析手法には次のような問題がある。火山灰の累積したものであるため堆積速度が一定でないことが予想される。要因としては、例えば噴煙の主軸がその地点上を通過すると堆積量が増え、火山泥流や火砕流などの流れ堆積物ももたらされることもあり得る。古い方の試料は圧密により長期間分の情報を含みうる。また較正年代の幅の問題はあるが、土壌の年代をみるとAs-CとAs-B'の直上に400~500年のギャップが存在するらしい。大規模噴火の後、植生の回復や土壌の形成がされるまで火山灰粒子の固定が難しく、中小規模噴火の情報は欠落するとみられる。火山灰土壌に着目して過去の噴火を解読する手法は地質情報の分解能の限界への挑戦ともいえ、解決すべき課題も多いが、中小規模噴火を含む噴火履歴復元のためにはこうした方法論の模索が必要といえる。

4. 中長期におこりうる噴火の可能性評価手法の開発に向けて

2.1と3.2に示した手法を組み合わせれば、多様な規模の噴火の履歴を高分解能で復元できる可能性がある。現在活動的な火山について、最近の火山観測データを含めて噴火史全体を俯瞰することで、長期スパンで“現在の活動”を位置付けることができるかもしれない。一般に大規模噴火に比べ中小規模噴火の方が発生頻度は高いとみられる。中小規模噴火の活動パターンや大規模噴火の関連がみえてくれば中長期的な活動予測に役立つことが期待される。

1902-2005年の浅間火山の水準測量の観測結果を精査したMurase *et al.* (2007)は、1920~1940年頃(連続的噴火期の前半期)には噴火によるマグマの消費がマグマ供給に追いつかずマグマ溜りが膨張を続けたのに対して、1940~1960年(後半期)にはマグマ溜りに蓄積された余剰なマグマが放出されることでマグマ溜りが収縮したと考えた。また単発的噴火ではマグマ供給率とマグマ溜りの容積が一定のため、マグマ溜りへのマグマの蓄積が一定のレベルに達すると噴火が生ずると推定した。このように浅間火山の連続的噴火期と単発的噴火のマグマ供給メカニズムには違いがあるとみられる。しかし上記の連続的噴火期は60年以上前のことであり、火口底までマグマが上昇した1973年と2004年の数か月間の活動を除くと、1960年以降は静穏な状態が続いている。

一方桜島火山は現在活発な時期にあり、1939~1946年や1955年以降にブルカノ式噴火や灰噴火の活動がみられ、2015年には大きな地殻変動も観測されている。気象庁の活火山総覧によれば8~18世紀の間は数100年おきに中小規模の噴火があったようにも捉えられるが、浅間火山同様に記録が少ない時代の評価は難しい。井村(1995)は大正噴火以降の火山灰層について5cm刻みの試料の諸性質の垂直変化と噴火回数を比較し、堆積物の岩相と活動の消長の関係を示した。このように火山灰層や火山灰土壌に着目して、大正噴火から天平噴火までの各大規模噴火の間の期間、さらにそれ以前と、数千年以上の時間のスパンで南岳の活動の実態が見えれば興味深い。長年にわたって観

測データが蓄積されている火山について、浅間火山におけるA～Dタイプのような噴火の分類をし、最近および過去の火山灰の特徴との対応がわかれば、大規模噴火を含む活動の将来予測に役立つかもしれない。

5. おわりに

浅間前掛火山の事例では、試作した過去1万年間の階段図から、2000年前以降に大規模噴火の規模と頻度に大きな変化があったという大局的な描像が得られた。しかし階段図作成には、時間空間的な地質情報の分解能の制約が大きい。時代が古くなるほど横軸の噴火年代は決めにくなり、地下に埋没して認識されない噴火イベント(階段のステップ)もありうる。縦軸に示されるマグマ噴出量も、例えば18世紀の天明噴火に比べ、12世紀やそれ以前の噴火の見積り精度はかなり落ちる。つまり多くの仮定を置いて作成しなければならないのが階段図の限界といえよう。また長期にわたって火山灰を放出するような活動を階段図に反映させることは難しく、中小規模噴火の履歴復元は、方法論の模索段階にある。従って、最大限の噴火履歴復元の努力の上に作成した階段図であっても、階段図の性質や限界を念頭に置いた上で、活動評価等の参考とする必要があるだろう。

引用文献

- 井村隆介 (1995)小噴火の累積でつくられた堆積物. 火山, **40**, 119-132.
- 気象庁日本活火山総覧(第4版) Web掲載版(閲覧日:2023年11月25日)
https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/90_Sakurajima.pdf
- 水上武(1935)最近の浅間火山の活動(1). 地震, **7**, 1-21.
- 宮崎務(2003)浅間火山活動記録の再調査. 東京大学地震研究所彙報, **78**, 283-463.
- Murase, M., Ono, K. Ito, T., Miyajima, R., Mori, H., Aoyama, H., Oshima, H., Yoshida, Y., Terada, A., Koyama, E., Takeda, T., Watanabe, H., Kimata, F. and Fujii, N (2007) Time-dependent model for volume change in pressure source at Asama volcano, central Japan due to vertical deformation detected by precise leveling during 1902-2005. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **164**, 54-75
- 高橋正樹・安井真也・金丸龍夫(2020)浅間前掛火山高分解能テフラ層序のための降下テフラ・トレンチ掘削プロジェクト2016~2018年度成果報告—地質記載・14C年代・軽石全岩化学組成. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **55**, 99-153
- Takahashi, M, Yasui, M., Kanamaru, T. and Nakagawa, M. (2022) Eruptive Volume and Age of Large-Scale Pumice Eruptions of Asama-Maekake Volcano, Central Japan, Revealed from Detailed Trench Surveys: Implications for Future Volcanic Hazards. *J. Disaster Res.*, **17**, 1080-1089
- Yasui, M. and Koyaguchi, T. (2004) Sequence and eruptive style of the 1783 eruption of Asama Volcano, central Japan: a case study of an andesitic explosive eruption generating fountain-fed lava flow, pumice fall, scoria flow and forming a cone. *Bull. Volcanol*, **66**, 243-262.

安井真也 (2015) 降下火砕堆積物からみた浅間前掛火山の大規模噴火. 火山, 60, 211-240.

安井真也・高橋正樹・金丸龍夫・長井雅史 (2021) 降下火砕堆積物層序に基づく浅間前掛火山の大規模噴火の高分解能噴火履歴復元. 火山, 66, 293-325

【本文 2.3 に関する付録】

1. 降下火砕堆積物について

2016年に「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」によりトレンチ調査を開始して以来、地下に埋没した堆積物の確認が大きく進展した。それ以前の地表踏査で作成した等層厚線図(安井(2015)の Fig.9)と比べると、いずれの堆積物も地点数が増えたが、As-Cなどの古い堆積物の調査地点の割合が少ないのは変わらない(第3図)。等層厚線図の作成が難しい事例は後述するが、その困難さに起因して噴出量の見積りには以下のように仮定が多い。12世紀以前の堆積物の等層厚線図が十分に描けていないため、Takahashi *et.al.*, (2022)は、同一の等層厚線が囲む面積は噴出量に比例すると仮定し、As-Aの64cm等層厚線の面積と比較的に描けているAs-B⁺、As-B、As-C、As-E、As-Fの64cm等層厚線の囲む面積との比を用い、As-Aの推定噴出量(Yasui and Koyaguchi, 2004)に基づく比例配分によって各堆積物の噴出量を求めた。

等層厚線図の作成に関して、地表直下に出現する天明噴火のAs-Aは調査地点数が多いのに対して、12世紀のAs-BやB⁺は数が減り、2世紀のAs-Cに至っては地点数が限られ、図上で閉じていない等層厚線も多い(第3図)。トレンチ掘削開始により古い堆積物の確認の機会が劇的に増え、As-Bなどの等層厚線の通過位置も精度があがった。As-AからAs-Bまでは特徴的な岩相を示すAs-B⁺を挟んでセットで認識しやすいが、As-Cとそれより古いものは岩相が類似して区別が難しい。これらについては、直下の土壌の¹⁴C年代測定により地点間対比の材料が得られるようになった。例えば土壌を挟んでAs-Bの下位に出現した軽石層に注目する。軽石層直下の土壌がAs-C(第3図)の丸で囲んだ値の地点は2世紀前後の年代、×の地点は5000年前などとAs-Cより古い年代を示した。これは分布域の決定に年代測定が役立つ事例である。

さらに時代の古い降下火砕堆積物では、約6300年前頃の年代で火口の3方向に分布するものをEグループとした。Eグループのうち東北東方向に分布するADFは、64cmの等層厚線の面積からClass1に分類された。ADFは火口から3.4km地点のボーリング掘削で確認されたが、それより近傍の山腹斜面のガリーでは最深部でもAs-Cまでしか確認できない。遠方では露頭が少なく、追跡できたのは山頂火口から10km以内である。このため現状では、ADFの64cmより薄い等層厚線は図上で閉じていない(安井・他, 2021の Fig.5g)。

またAs-CとEグループの間の年代を示す軽石層が多数出てきたため、Dグループとした。その中で唯一等層厚線図を作成できたのがD-SSWである(安井・他, 2021の Fig.5f)。より新しい時代の降下火砕堆積物が少ない南～南南西に分布するため、表層近くの黒色土壌中に発見された。D-SSWは64cmの等層厚線が描け、16cm等層厚線の囲む面積からClass2に分類された。しかし火口から5

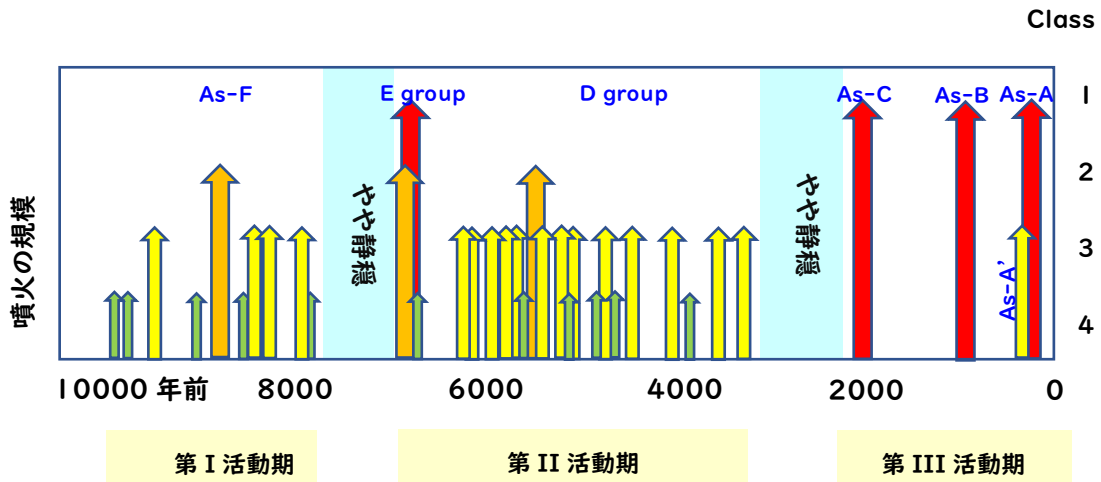
km 以遠では土壤中に軽石粒子が散在する産状となり、直下の土壤の年代測定で対比を行った。

Class 3 に分類された As-A の NNW と NE, および As-A' は表層近くの黒色土壤中に発見されるため、地点間対比が可能で、等層厚線図が描ける(第3図)。一方、Dグループやそれより古い時代で Class3 や Class4 に分類された軽石層は様々な方向に見られるが、地点間対比ができず等層厚線図の作成に至っていない。数地点ではDグループの軽石層が土壤中に複数見られたが、それ以外の地点では単層であった。これらは個々のトレンチ地点で層厚が薄く、風化した黄褐色軽石で構成される。特徴的な岩相を示さず、地点間対比が難しい例といえる。

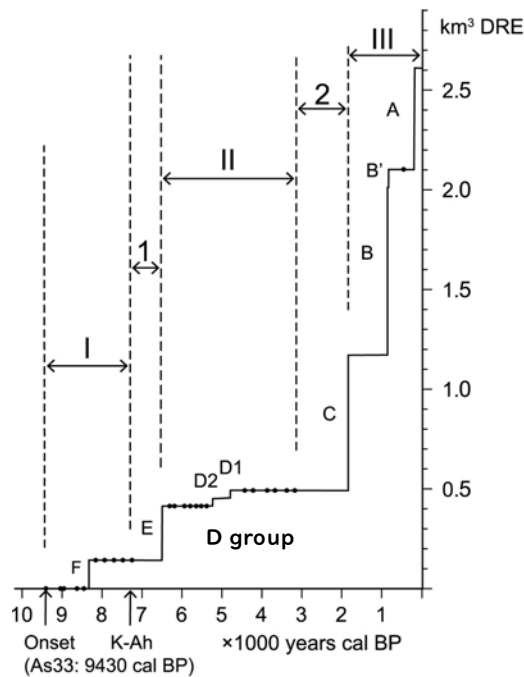
Class 4 は土壤中のあるレベルに軽石が散在する産状であり、噴火の痕跡としては認識されるが、等層厚線図は作成できない。前掛火山の降下火砕堆積物の等層厚線図は、特定方向に伸長した形状を呈する機会が多いことから、噴火時の上空の風に噴煙が強く流される傾向がある。Class 3 や4 については、トレンチ掘削のされていない方角に分布するために認識できていない噴火イベントもあるはずである。存在も認識されない古い堆積物の見落としは避けがたいといえる。

2. 降下火砕堆積物以外の噴出形態の堆積物について

降下火砕堆積物以外の噴出形態の堆積物も、過去の噴出量の推定には多くの困難が伴い、露出が十分でない場合に、かなり強引な仮定をおくことになった。Takahashi *et.al.*(2022)は階段図の作成にあたり、噴出年代が新しく噴出量推定の分解能が高いとして天明噴火の推定噴出量 (Yasui and Koyaguchi, 2004) を基準にした。As-C より前の時代の溶岩は露出が認められないため、その噴出量は降下軽石堆積物の噴出量に比例すると仮定して、As-A とその他 As-C などの噴出量の比から、鬼押出溶岩の噴出量を基準に比例配分して求めた。また 2.1 で述べた2世紀の小滝火砕流堆積物は正確な分布が不明である。Takahashi *et.al.* (2022)は、最も遠方で確認された地点の距離が18世紀の吾妻火砕流堆積物と12世紀噴火の追分火砕流堆積物の約半分であることを考慮し、両者の中間規模であると仮定して噴出量を推定した。天明噴火は火口近傍の堆積比率が大きい (Yasui and Koyaguchi, 2004)、同様の比率を過去の噴火にも適用できるのかという疑問も生じる。古い時代の堆積物について、多くの仮定の上に噴出量を推定せざるを得ない点は階段図作成の上の限界の一つといえるだろう。

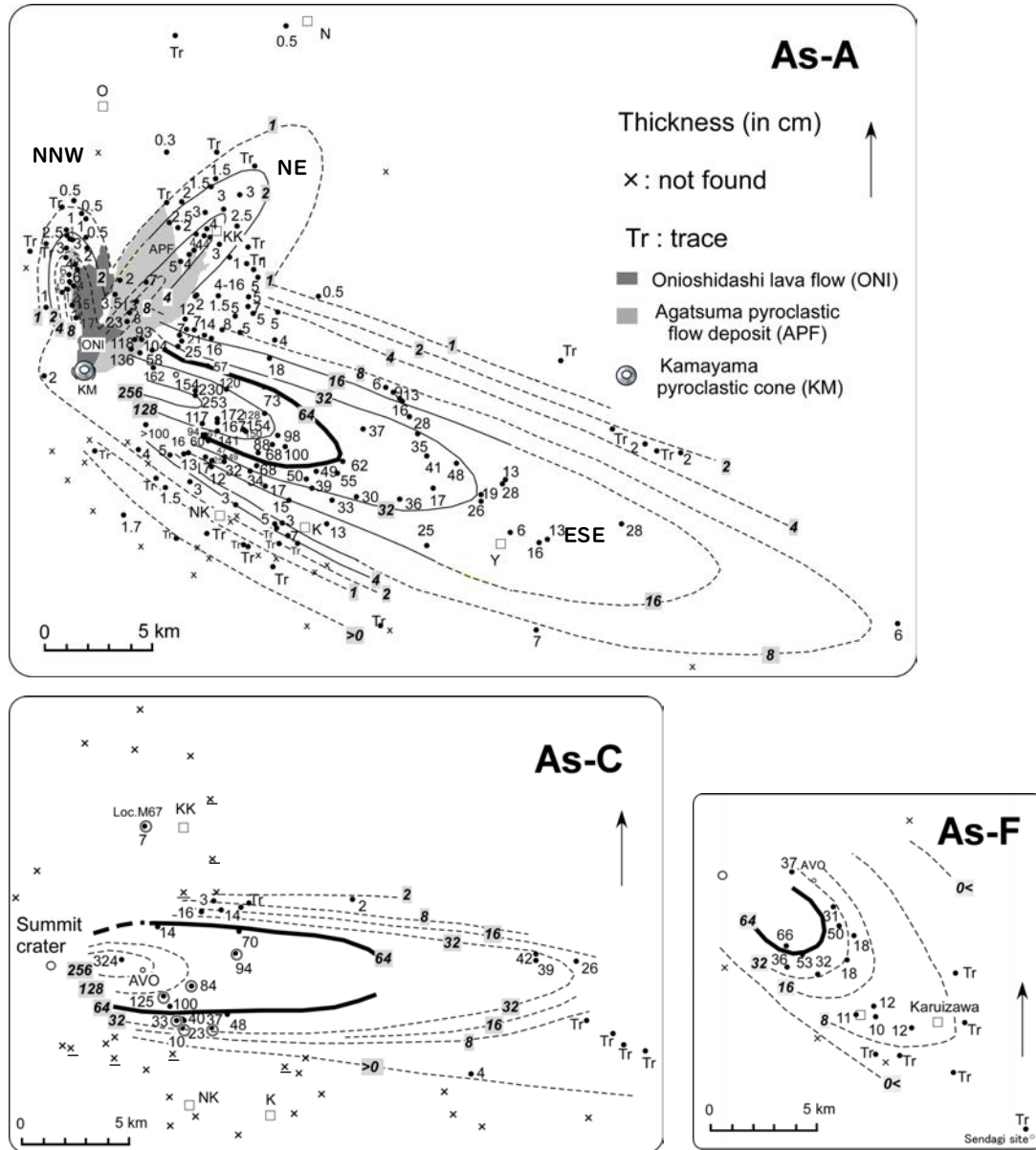


第1図 降下火砕堆積物をもたらした噴火に注目した浅間前掛火山の噴火史(安井・他, 2021 の Fig.8 をもとに作成)



第2図 浅間前掛火山の大規模噴火の階段図(Takahashi *et al.*, 2022 Fig.8 に加筆)

I-III: 活動期; 1-2: やや静穏な時期; A~F: 降下火砕堆積物(As-A~As-F)をもたらした個々の噴火の推定噴出量; 黒丸: A-F より規模の小さい噴火; K-Ah: アカホヤ火山灰(7300年前の鬼界カルデラからの広域テフラ)



第 3 図 浅間前掛火山の時代の異なる降下火砕堆積物の等層厚線図の例（安井・他,2021 の Fig.5 に加筆） As-A:18 世紀, As-C:2 世紀, As-F: 約 8300 年前

地質学的記録に基づく火山活動評価の高度化

○三浦大助¹・奥野 充¹

¹ 大阪公立大学大学院理学研究科地球学専攻

〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号. Email: miura@omu.ac.jp

1. はじめに

歴史記録や地質学・岩石学に基づく火山噴出物の研究は、中・大規模噴火プロセスに関する知見を与え、防災施策の策定に資するなどの社会実装として役立てられる (e.g., Miyaji *et al.*, 2011). 数千～数万年の中・長期間に亘る火山活動で残された火山噴出物の持つ情報は、マグマがマグマ供給系に供給され、貯蔵され、輸送され、最終的に噴出するまでの仕組みに重要な制約を与えると考えられている. このような中・長期の火山活動を反映した平均的マグマ噴出率(以下、平均噴出率と呼ぶ)は、地殻や上部マントルのマグマ供給システムを反映するパラメータの一つであり(Spera and Crisp, 1981; Wadge, 1982), マグマ供給に関係する要因には、マグマの化学組成、地殻の厚さ、地殻構造、地域応力などがある(Crisp, 1984). 平均噴出率は、「高温」のマグマとマグマが通過する「低温」の地殻との相互作用にも依存するため(Jellinek and DePaolo, 2003), その変動は深部からの供給速度の変化やマグマ貯蔵条件の変化に起因すると考えられる(Dvorak and Dzurisin, 1993; Costa, 2008).

火山の過去および将来の挙動を理解するための証拠として、地質学的記録より得られる噴出体積(DRE)と噴火年代からなる詳細データセットが重要であるが、このようなデータセットが完全に近い形で把握される事例は少なく、これには次の様な要因が関係する(Miura *et al.*, 2013): (1) 浸食量, (2) 噴出物の変質や弱変成の程度, (3) 噴出物の「質」や「保存の完全性」, (4) 年代測定法, (5) 噴火現象の順序や噴出物の規模. このうち(3)-(5)は、噴火史研究において特に重要な要素である. 中・長期火山活動評価に関わる今後の研究の方向性を考えるには、これらの課題を如何に克服するかという視点が必要である. 以下では、特に平均噴出率に関わる話題に焦点を当て、地質学的記録に基づく火山活動評価の高度化に向けて考えておくべき要点を整理してみたい.

2. 噴出体積と年代測定の高精度化

いわゆる一輪廻の噴火(Nakamura, 1964; 町田・新井, 2003)を、噴火休止期で定義される噴火エピソード(Hayakawa, 1985)と呼ぶことにすると、単一の噴火エピソードあたり平均噴出率は、先行する活動休止期の長さや噴出体積の比で表すことができる. 火山の噴火史に従ってこれらを並べ、噴火年代を横軸に、噴出体積(DRE)を累積分布として縦軸に表したものがいわゆる階段図である(e.g., Nakamura, 1964; Wadge, 1982; Salisbury *et al.*, 2011).

平均噴出率を精度良く求めることは、噴出体積と休止期間の測定精度を上げることに他ならない. 火山活動に関わる基本的物理量である噴出体積を実測できるのは、噴出物研究の利点の一つである.

近年は Digital Elevation Map (DEM) やボーリング調査・トレンチ調査の活用などにより、より精度良く噴出体積が求められるようになってきている (e.g., 宝田ほか, 2022a; 2022b; 星住ほか, 2023).

休止期間を決める年代の測定技術は進展が著しい。 ^{14}C ウィグル・マッチングや縞編年学により、湖沼堆積物が精密に年代決定され、広域テフラ噴火年代の信頼性が大きく向上した (e.g., Smith *et al.*, 2013; Albert *et al.*, 2019). 火山山麓に見られるテフラの編年精度も向上している (e.g., Yamamoto *et al.*, 2023). また、樹木年輪中に宇宙線増加で生じた ^{14}C スパイク (Miyake *et al.*, 2012) が発見され、年単位の年代決定ができるようになった (e.g., Wacker *et al.*, 2014). これを噴火年代に適用して AD774-775 の ^{14}C スパイクを基準に年輪を計数して 10 世紀白頭山噴火を AD946 年と確定した (Oppenheimer *et al.*, 2017; Hakozaki *et al.*, 2018). このことは編年研究の大きな成果といえる (奥野, 2019).

4. 土壌

土壌の形成は噴火休止期の証拠であり噴火エピソードの認定に不可欠である。土壌の形成とその風化・浸食は、気候、生物、地形、母岩、時間等の要素が大きく関わっており (e.g., Kraus, 1999; Sheldon and Tabor, 2009; Tabor and Myers, 2015), 噴火休止期間と共に噴火エピソードの検出精度にも大きく影響する。気候は温度-雨量関係 (例えば年間平均降水量: Mean annual precipitation: MAP; e.g., Retallack, 2005) の影響が大きく、寒冷地や極低雨量の下では土壌の発達極めて悪い。生物は土壌有機物の供給源であると共に、樹木の根の周囲にはバクテリア、菌類等の微生物が成育し葉や木片など有機物を分解する。地形的高地は乾燥して土壌の集積度が低く、中・低地は湿潤で集積度が高い。母岩は形成土壌の化学的性質に、時間は土壌の圧密 (e.g., Sheldon and Retallack, 2001) や風化・浸食と共に、古環境の変遷に関連する。これらの知見と露頭観察の経験則から考えると、日本のような中緯度帯では、完新世の黒色火山灰土(クロボク)において非常に高い時間分解能が見込まれる (第 1 図)。技術的進展が著しい編年研究と組合せれば、数多くの VEI5 以下の噴火エピソードを検出できると期待される。

5. 平均噴出率と火山活動評価

地質学的記録に基づく火山活動評価には、上述した手法により高精度な地質情報を取得して火山活動の示標を得ることが不可欠である。すなわち、噴出体積・年代の高精度な測定技術を援用し、完新世噴火データベースの整備と充実を優先的に行い、完新世データに基づく火山活動評価の示標を提案できるようになることが喫緊の課題と考えられる。また、高精度な噴火史データの整備によって階段図の精度も上がる。深部からの定常的なマグマ供給が仮定できる場合、階段図の傾きは中・長期的火山活動の特徴を表す (e.g., Wedge *et al.*, 1982). グローバルデータセットを用いて島弧など「地域」の平均体積噴出率を求め、マグマ組成やテクトニクス場の違いも議論されている (e.g., White *et al.*, 2006). 一方、最近の研究では、長期間に亘る定常的マグマ供給と共に、エピソード的なマグマ供給の増加が強調されている (e.g., Costa *et al.*, 2008; Yamamoto *et al.*, 2018; Bertin *et al.*, 2023).

非定常なマグマ供給システムを明らかにして活動評価の精度を向上するには、噴火史研究とマグマ溜まり研究を融合させ新たな知見を得ていく必要がある。例えば、地殻のマグマ溜まりを模擬した熱伝導モデルによると、ある時点の噴火可能マグマ (eruptible magma: e.g., Takeuchi, 2011) の生成量は、冷却(-)とマグマ供給(+)の相互作用に支配されるため、供給開始からの経過時間とマグマ供給率に影響を受ける (Annen, 2009)。このようなモデル計算や「地域」の平均噴出率から、ある火山の噴火可能マグマ貯留量を推計し、完新世噴火記録から求められる休止期間や平均噴出率と比較すると、噴火規模のポテンシャルを計る一つの方法になり得るかもしれない。

≥VEI6 巨大噴火の活動休止期は 1 万年を超えることがあり完新世データセットでは不十分である。したがって精度は劣るがより長期の噴火履歴が必要である。100 万年を超える長期間では、火山の一生がほぼ網羅されることから階段図が有効に活用されている。例えば南米 Altiplano-Puna Volcanic Complex (APVC: de Silva, 1989)や北米の San Juan Mountains の階段図 (Lipman and McIntosh, 2008) では、巨大噴火活動期の平均噴出率の急増 (flare-up: e.g., de Silva, 2008) が明瞭な変化として捉えられている。APVC では、150-300 万年ごとに巨大噴火活動期があり、3Ma 以降は Apparent waning stage (みかけ衰退期) と認識されていた (Salisbury *et al.*, 2011)。この APVC 地域に属するボリビアの Uturuncu 火山では、1992-2006 年の InSAR 観測により顕著な地殻変動が検出された (e.g., Pritchard and Simons, 2002)。地殻変動モデルにより力源が推定され (球体: Sparks *et al.*, 2008; 楕円体: Hickey *et al.*, 2013), Altiplano-Puna Magma Body (APMB) と呼ばれる地殻内容融体との関係が議論された。すなわち実際の unrest イベントが生じたことで APVC を capable 火山とした階段図の解釈を観測が検証する事例になった。一方で、日本の活動的カルデラ火山は、後期更新世以降に活動を始めたものが多いことから、≥100 万年に亘る火山活動を把握することが難しく、階段図を考察するために必要にして十分なデータセットを得難い状況である。

引用文献

- Albert, P.G., Smith, V.C., Suzuki, T., McLean, D., Tomlinson, E.L., Miyabuchi, Y., Kitaba, I., Mark, D.F., Moriwaki, H., SG06 Project Members and Nakagawa, T. (2019) Geochemical characterisation of the Late Quaternary widespread Japanese tephrostratigraphic markers and correlations to the Lake Suigetsu sedimentary archive (SG06 core). *Quaternary Geochronology*, **52**, 103-131. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2019.01.005>
- Annen, C. (2009) From plutons to magma chambers: Thermal constraints on the accumulation of eruptible silicic magma in the upper crust. *Earth and Planetary Science Letters*, **284**, 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.006>
- Bertin, D., de Silva, S.L., Lindsay, J.M., Cronin, S. J., Caffè, P. J., Connor, C. B., Grosse, P., Báez, W., Bustos, E. and Constantinescu, R. (2023) Magmatic addition rates differentiate periods of steady-state versus flare-up magmatism in the Central Andean arc. *Communications Earth & Environment*, **4**, 75. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00744-2>

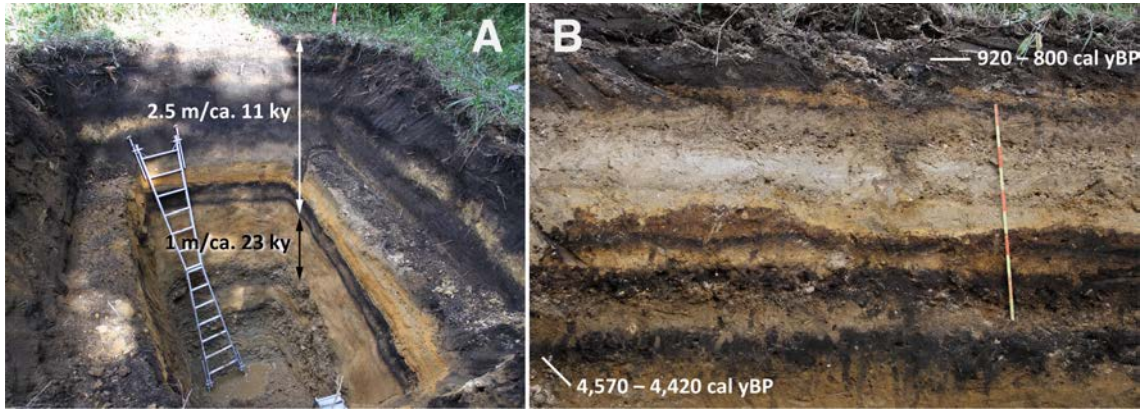
- Costa, F. (2008) Residence times of silicic magmas associated with calderas. *in Caldera Volcanism: Analysis, Modeling and Response* (Gottsmann, J. and Martí, J. eds.). *Developments in Volcanology*, **10**, Amsterdam, Elsevier, 1-55. [https://doi.org/10.1016/S1871-644X\(07\)00001-0](https://doi.org/10.1016/S1871-644X(07)00001-0)
- Crisp, J. A. (1984) Rates of magma emplacement and volcanic output: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **20**, 177-211. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- de Silva, S. L. (1989). Altiplano-Puna Volcanic Complex of the Central Andes. *Geology*, **17**, 1102-1106. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<1102:apvcot>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<1102:apvcot>2.3.co;2)
- de Silva, S. (2008) Arc magmatism, calderas, and supervolcanoes. *Geology*, **36**, 671-672, <https://doi.org/10.1130/focus082008.1>
- Dvorak, J.J. and Dzurisin, D. (1993) Variations in magma supply rate at Kilauea volcano, Hawaii: *Journal of Geophysical Research*, **98**, 22,255-22,268. <https://doi.org/10.1029/93JB02765>
- Hakozaki, M., Miyake, F., Nakamura, T., Kimura, K., Masuda, K. and Okuno, M. (2018) Verification of the annual dating of the 10th century Baitoushan Volcano eruption based on AD 774-775 carbon-14 spike. *Radiocarbon*, **60**, 261-268. <https://doi.org/10.1017/RDC.2017.75>
- Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, **60**, 507-592.
- Hickey, J., Gottsmann, J. and del Potro, R. (2013) The large-scale surface uplift in the Altiplano-Puna region of Bolivia: A parametric study of source characteristics and crustal rheology using finite element analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **14**, 540-555. <https://doi.org/10.1002/ggge.20057>
- 星住英夫・宝田晋治・宮縁育夫・宮城磯治・山崎 雅・金田泰明・下司信夫 (2023) 阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図. 1/250,000, 大規模火砕流分布図 No.3, 産総研地質調査総合センター. <https://www.gsj.jp/Map/JP/lvi.html>
- Jellinek, A.M. and DePaolo, D.J. (2003) A model for the origin of large silicic magma chambers: Precursors of caldera-forming eruptions: *Bulletin of Volcanology*, **65**, 363-381, <https://doi.org/10.1007/s00445-003-0277-y>
- Kraus, M. J. (1999) Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications. *Earth-Science Reviews*, **47**, 41-70. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00026-4)
- Lipman, P. W. and McIntosh, W. C. (2008) Eruptive and noneruptive calderas, northeastern San Juan Mountains, Colorado: Where did the ignimbrites come from? *Geological Society of America Bulletin*, **120**, 771-795. <https://doi.org/10.1130/B26330.1>
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラスー日本列島とその周辺. 東京大学出版会, pp. 336.
- Miura, D., Arai, K., Toshida, K., Ochiai, T., Tanaka, M. and Iida, T. (2013) Eruption history, conduit migration, and steady discharge of magma for the past 50,000 yr at Esan volcanic complex, northern Japan. *Geological Society of America Bulletin*, **125**, 1503-1519. <https://doi.org/>

10.1130/ B30732.1

- Miura, D., Furukawa, R. and Arai, K.-i. (2019) Late Pleistocene-Holocene volcanoclastic ejecta at the southern apron of Esan volcanic complex, Japan. *Journal of Disaster Research*, **145**, 755-765. <https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0755>
- Miyaji, N., Kan'no, A., Kanamaru, T. and Mannen, K. (2011) High-resolution reconstruction of the Hiei eruption (AD 1707) of Fuji volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **207**, 113-129. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06.013>
- Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K. and Nakamura, T. (2012) A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan. *Nature*, **486**, 240-242. <https://doi.org/10.1038/nature11123>
- Nakamura, K. (1964) Volcano-Stratigraphic Study of Oshima Volcano, Izu. *Bulletin of Earthquake Research Institute University of Tokyo*, **42**, 649-728.
- 奥野 充 (2019) 最近10万年間の広域テフラと火山層序に関する年代研究. *地質学雑誌*, **125**, 41-53. <https://doi.org/10.5575/geosoc.2018.0069>
- Oppenheimer, C., Wacker, L., Xu, J., Galván, J.D., Stoffel, M., Guillet, S., Corona, C., Sigl, M., Cosmo, N.D., Hajdas, I., Pan, B., Breuker, R., Schneider, L., Esper, J., Fei, J., Hammond, J.O.S. and Büntgen, U. (2017) Multi-proxy dating the “Millennium Eruption” of Changbaishan to late 946 CE. *Quaternary Science Reviews*, **158**, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.12.024>
- Pritchard, M. and Simons, M. (2002) A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes. *Nature*, **418**, 167-171. <https://doi.org/10.1038/nature00872>
- Retallack, G. J. (2005) Pedogenic carbonate proxies for amount and seasonality of precipitation in paleosols. *Geology*, **33**, 333-336. <https://doi.org/10.1130/G21263.1>
- Salisbury, M. J., Brian R. Jicha, B. R., de Silva, S. L., Singer, B. S., Jiménez, N. C. and Ort, M. H. (2011) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a major magmatic province. *Geological Society of America Bulletin*, **123**, 821-840. <https://doi.org/10.1130/B30280.1>
- Sheldon, N. D. and Retallack, G. J. (2001) Equation for compaction of paleosols due to burial. *Geology*, **29**, 247-250. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0247:EFCOPD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0247:EFCOPD>2.0.CO;2)
- Sheldon, N. D. and Tabor, N. J. (2009) Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. *Earth-Science Reviews*, **95**, 1-52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.03.004>
- Smith, V. C., Staff, R. A., Simon P.E. Blockley, S. P. E., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T., Mark, D. F., Takemura, K., Danhara, T., Suigetsu 2006 Project Members (2013) Identification and correlation of visible tephra in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan:

- chronostratigraphic markers for synchronising of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. *Quaternary Science Reviews*, **67**, 121-137. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.01.026>
- Sparks, R. S. J., Folkes, C. B., Humphreys, M. C. S., Barfod, D. N., Clavero, J., Sunagua, M. C., McNug, S. R. and Pritchard, M. E. (2008) Uturuncu volcano, Bolivia: Volcanic unrest due to mid-crustal magma intrusion. *American Journal of Science*, **308**, 727-769, <https://doi.org/10.2475/06.2008.01>.
- Spera, F.J. and Crisp, J.A. (1981) Eruption volume, periodicity, and caldera area: Relationships and inferences on development of compositional zonation in silicic magma chambers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **11**, 169-187. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(81\)90021-4](https://doi.org/10.1016/0377-0273(81)90021-4)
- 宝田晋治・西原 歩・星住英夫・山崎 雅・金田泰明・下司信夫 (2022) 始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図. 1/250,000, 大規模火砕流分布図 No.1, 産総研地質調査総合センター. <https://www.gsj.jp/Map/JP/lvi.html>
- 宝田晋治・中川光弘・宮坂瑞穂・山元孝広・山崎 雅・金田泰明・下司信夫 (2022) 支笏カルデラ支笏火砕流堆積物分布図. 1/250,000, 大規模火砕流分布図 No.2, 産総研地質調査総合センター. <https://www.gsj.jp/Map/JP/lvi.html>
- Tabor, N. J. and Myers, T. S. (2015) Paleosols as indicators of paleoenvironment and paleoclimate. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **43**, 333-61. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105355>
- Takeuchi, S. (2011) Preeruptive magma viscosity: An important measure of magma eruptibility. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B10201. <https://doi.org/10.1029/2011JB008243>
- Wacker, L., Güttler, D., Goll, J., Hurni, J.P., Synal, H.-A. and Walth, N. (2014) Radiocarbon dating to a single year by means of rapid atmospheric C-14 changes. *Radiocarbon*, **56**, 573-579. <https://doi.org/10.2458/56.17634>
- Wadge, G. (1982) Steady state volcanism: Evidence from eruption histories of polygenetic volcanoes: *Journal of Geophysical Research*, **87**, 4035-4049. <https://doi.org/10.1029/JB087iB05p04035>
- White, S. M., Crisp, J. A., and Spera, F. J. (2006) Long-term volumetric eruption rates and magma budgets, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **7**, Q03010. <https://doi.org/10.1029/2005GC001002>
- Yamamoto, S., Kametani, N., Yoshimoto, M., Miyairi, Y., Yokoyama, Y. (2023) Eruptive history of Mt. Fuji over the past 8000 years based on integrated records of lacustrine and terrestrial tephra sequences and radiocarbon dating. *Quaternary Science Advances*, **12**, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100091>
- Yamamoto, T., Kudo, T. and Ishizuka, O. (2018) Temporal variations in volumetric magma eruption

rates of Quaternary volcanoes in Japan. *Earth, Planets and Space*, **70**, 65. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0849-x>



第 1 図 火山山麓のトレンチ壁面で見られたテフラと土壌の事例。(A) 時代による土壌層厚の違い。それぞれの土壌はテフラを挟んでいるが、完新世黒色火山灰土(2.5m/約 1.1 万年)と先完新世の褐色火山灰土(1m/約 2.3 万年)の形成速度の違いは明瞭である。(B) 数多くのテフラを挟む黒色火山灰土のトレンチ壁面。黒色火山灰土は形成速度が早く、数多くの噴火エピソードが識別された。写真と年代値の出典は Miura *et al.* (2019)。

「噴火予測のための簡単なマグマ供給系モデル」の階段図によるパラメタ推定

安田 敦¹

1:東京大学地震研究所

〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1 Email: yasuda@eri.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

次世代火山研究推進プロジェクトの課題 C-1 グループでは、「火山噴出物分析による噴火事象分岐予測手法の開発」という表題のもと、火山噴出物分析結果を火山噴火の様式と推移予測にどのようにつなげていくのかというテーマに取り組んできた。これまで、国内の 11 火山について最近の火山噴火の噴出物を解析する作業を通じて、マグマの分化する深度とそこでのマグマの状態、噴火に到るまでのマグマの移動についての情報を集めてきている。これらの物質科学的な情報を噴火の推移や規模予測に結びつけるためには、マグマ供給系のモデル化が必要であるが、噴火推移や規模予測に実際に利用することを前提にすると、可能な限りパラメタを減らした簡単なマグマ供給系モデルを作成することが求められる。これは、物質的あるいは観測によって実用的な精度で決定できるパラメタは多くはなく、あまり複雑なマグマ供給系を考えても活用できないためである。

比較的簡単なマグマ供給系モデルとしては、Blake (1981)や Huppert and Woods (2002)などのモデルがよく知られており、マグマ溜まりの大きさ、マグマの物性、揮発性成分量、周囲の地殻の破壊開始強度などを与えて、噴出量を推定することができる。我々が現在実用化を目指している「噴火予測のための簡単なマグマ供給系モデル」は、最も単純な Blake (1981)のモデルベースに個別の火山で実際に推定されたマグマ溜まり深度やマグマの組成・物性値を適用して計算を行い、現実の火山活動をうまく再現可能なように、モデルの修正や拡張を行うという指針のもと進められている。この際、現実の火山活動との比較に用いられるデータは、噴出量と噴火周期といった階段図の構成要素に加えて、岩脈の長さや幅、深部地震の分布、噴出物の組成である。もし適切なマグマ供給系モデルを作ることができれば、地下に伸長する岩脈の長さや震源の移動速度、予想されるマグマの組成などをもとにして、リアルタイムで噴火予測を更新することも可能になるかもしれない(図1)。しかしながら、現実の火山活動をうまく再現できるマグマ供給系モデルの作成は容易ではない。本稿では、階段図の構成要素である噴出量と噴火周期の観点から、我々の考えている現在のマグマ供給系モデルがどのように拡張(複雑化)される必要があったか、および、マグマ供給系モデルの是非の検討において今後何が必要かについて述べる。

2. 基本モデル

図 2(a)のように、一定のマグマ供給率でマグマの注入がある固定体積のマグマ溜まりの時間発展を考える。マグマの注入によってマグマ溜まりの過剰圧は次第に高まり、ある過剰圧を超えると噴火が

発生し、過剰圧が火道閉塞圧まで低下すると噴火は停止する。残ったマグマに再びマグマの注入が継続し、過剰圧を超えると次の噴火が発生するという時間発展モデルである。この時、マグマ溜まりの破壊開始の過剰圧と噴火停止となる火道閉塞圧に変動を与えることによって、噴出量や噴火間隔に変化を持たせることができる(図 2(b))。この時、破壊開始過剰圧を一定に保つと階段図の下側が揃った time predictable な噴火になり、火道閉塞圧を一定に保つと階段図の上側が揃った volume predictable の噴火となる(図 2(c))ことはよく知られており、地殻応力場の変化が噴火の噴出量や噴火間隔にどのように影響するかの検討にも使われている(例えば、小山・吉田, 1994)。

この単純なモデルでは、マグマ溜まりの大きさと流入量を適切に与えることにより、平均的な噴出量と噴火間隔を現実の火山活動と似たものにすることができる。しかしながら、噴出量と噴火間隔の頻度分布はユニモーダルになるとともに、それらの幅を現実の火山活動のように広くすることも困難である。例えば、図 3 は山元(2014)および石塚・他(2021)にコンパイルされた富士火山の噴火の年代と噴出量から作成した富士山の火山活動での噴出量の頻度分布と階段図である。噴出量は数桁にわたるとともに、ユニモーダルな分布とはなっていない。中央火口活動での溶岩噴火とテフラ噴火では噴出量の頻度分布にあまり違いが見られない一方で、cone の噴出量が系統的に低いことから、マグマの通過経路が噴出量に影響を与えている可能性がある。さらに、平均値よりも噴出量が 2 桁程度大きな貞観噴火や大室山噴火の噴出物組成が他の噴火とはあまり変わらないことから、マグマの物性(圧縮率)の一時的变化に原因を求めることはできないし、これらの噴火の前後の噴火での噴出量が大きくないことからマグマ溜まりの大きさが短期間に大きく変化したと考えるのは現実的ではない。したがって、噴出量に大きな変動幅が生じ得るようにマグマ供給系モデルを修正する必要がある。

3. 修正モデル

噴出量に幅を持たせる方法として浅部と深部の 2 つのマグマ溜まりの相互作用を考えることもできるが、富士山のマグマ供給系では深部のマグマ溜まりの活動が主体であることが知られており(Kaneko *et al.*, 2010)、2 つのマグマ溜まりモデルの導入は現実的ではない。そこで、過剰圧のみが噴火の発生と継続の原動力であった基本モデルに対して、修正モデルではマグマの浮力を取り入れた(図 4)。浮力は外部が変形することによってはじめて有効になるため、火道での静岩圧とマグマの流体圧の差による浮力項と、マグマ溜まり自体が変形して軽いマグマを押し出すマグマ溜まりでの浮力項を付け加えている。式(1)の上昇力(ϕ)がマグマ溜まりから地表までの全深度で火道閉塞力を超えている場合に地表への噴出が可能であり、途中で上昇力を失えば噴火未遂となる。

このモデルでは新たに、マグマ溜まり変形の時定数 τ 、地表からマグマ溜まり深度までの地殻密度構造、結晶分化や混合によって時間発展するマグマの密度、火道断面積が新たにパラメタとして付け加わった。これらのパラメタの中で、地殻密度構造は物理観測結果などからある程度適切な推定値を与えることが可能であり、火道断面積についても地表での岩脈の観察や噴火時のマグマの流量から制約することができよう。他のパラメタについては、計算結果が階段図と整合的となるように推定することになる。

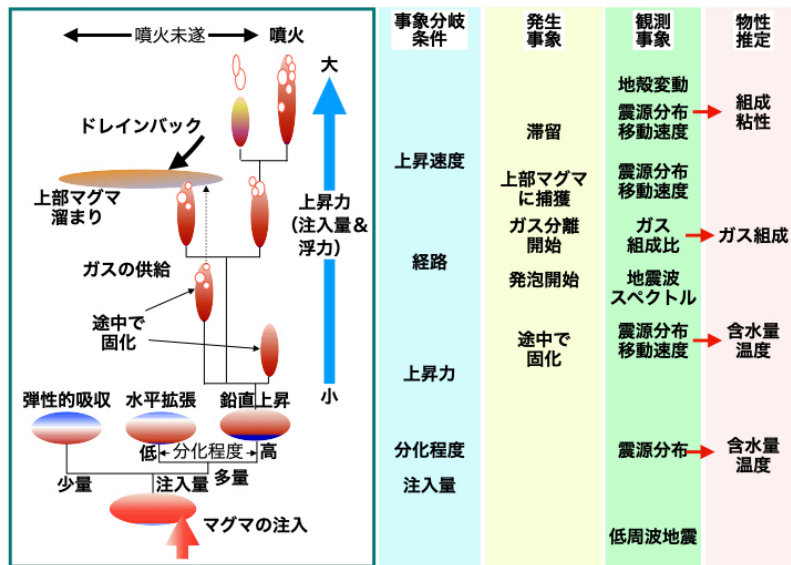
計算結果の一例を図5に示す。マグマの浮力とマグマ溜まり変形時定数 τ を適当に与えることによって、時々規模が平均よりも1桁以上大きな噴火を発生させられようになり、現実と似通った階段図の形状も得られるようになった。また、火道途中で上昇力を失い噴火未遂に終わるような例も現れており、観測で火山深部での地震が活発化したにもかかわらず噴火発生に至らないことが見られる事例とも整合的である(図6)。

4. 今後の課題

これまでの階段図には噴出物組成の情報が示されていないが、大部分の噴火については噴出物組成が公表されている(例えば, Yamamoto *et al.* (2021))。従って文献値をコンパイルするとともに不足分を測定することによってマグマ密度の時間変化は追跡できると思われる。修正モデルではマグマの密度が時間発展することを取り入れているので、現実の火山活動と比較してパラメタの妥当性を検討することができよう。とりわけ、マグマの密度と大規模噴火の発生確率間の相関やマグマの密度と噴火間隔との関係性が定性的な考察からは予想されており、これらの検討が喫緊の課題となっている。

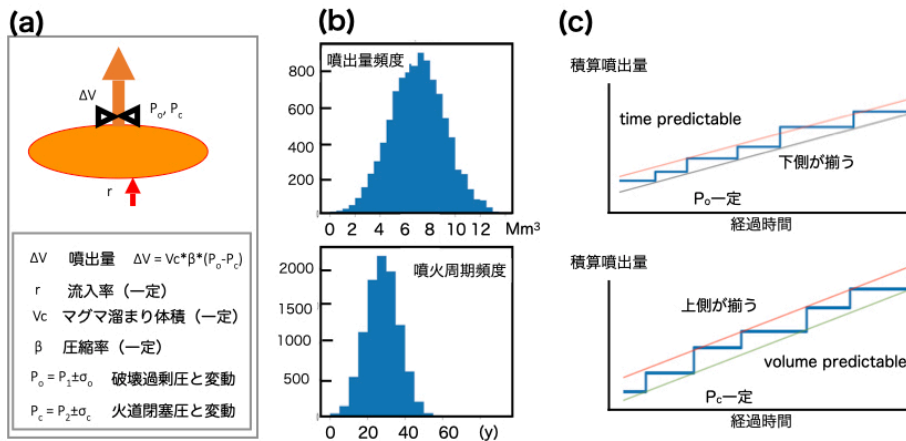
引用文献

- Blake, S. (1981) Volcanism and the dynamics of open magma chambers, *Nature*, **289**, 783–785.
- 防災科研火山活動連続観測網 VIVA ver.2 , <https://www.vnet.bosai.go.jp>
- Huppert H.E. and Woods, A.W. (2002) The role of volatiles in magma chamber dynamics, *Nature*, **420**, 493–495.
- 石塚吉浩・山元孝広・中野 俊・吉本充宏(2021) 富士火山、須走期噴出物の噴出量見積もり、地質調査総合センター研究資料集, no.715, 産総研地質調査総合センター。
- Kaneko, T., Yasuda, A., Fujii, T. and Yoshimoto, M. (2010) Crypto-magma chambers beneath Mt. Fuji, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **193**, 161–170.
- 小山真人・吉田浩 (1994) 噴出量の累積変化からみた火山の噴火史と地殻応力場, *火山*, **39**, 177–190.
- 山元孝広 (2014) 日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図, 地質調査総合センター研究資料集, no. 613, 産総研地質調査総合センター。
- Yamamoto, T., Nakano, S. and Ishizuka, Y. (2021) Temporal variations of magma composition, eruption style and rate at Fuji Volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, **73:169**, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01505-1>



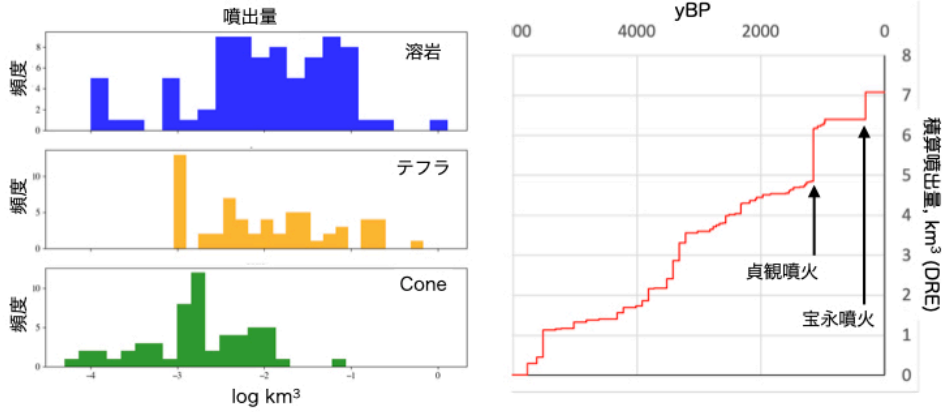
第1図 単純化した深部マグマ溜まりモデルによる噴火の推移と様式の予測の概念図

マグマ溜まりからのマグマの移動開始を物理観測から得て、マグマ溜まりの深度やマグマの物性からその後の発生事象を予測するとともに、観測によって得られた情報から随時マグマの物性を修正して予測の修正を行う。

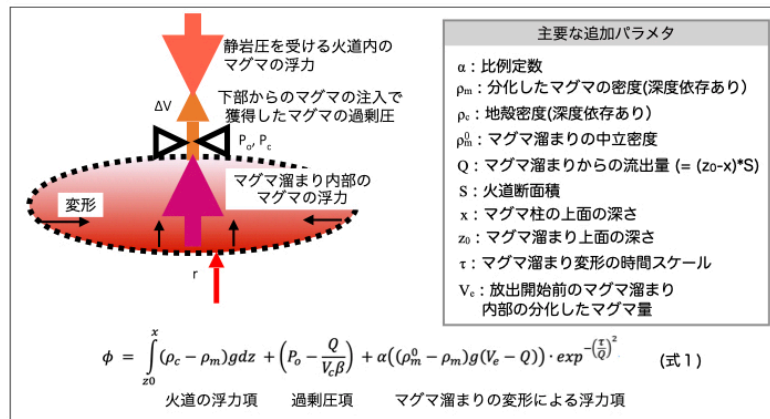


第2図 単純化したマグマ供給系モデルによる噴火発生シミュレーション結果

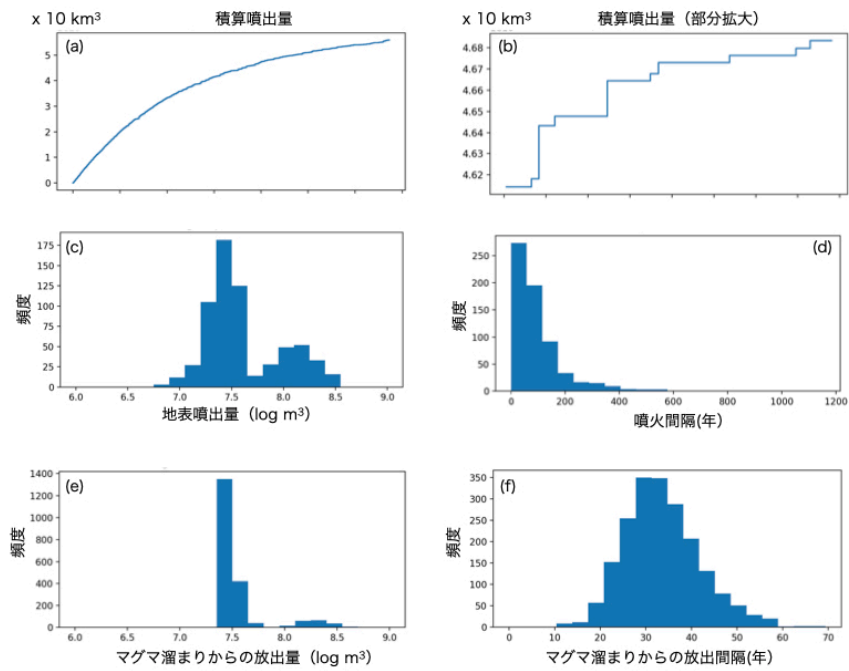
(a) マグマ溜まりモデル, (b) 噴出量と噴火周期の頻度, (c) マグマ溜まりが破壊する過剰圧を一定にした場合と火道閉塞圧を一定にした場合の階段図。



第3図 富士山の噴火での噴出量の頻度分布と階段図(山元, 2014; 石塚・他, 2021 のデータにより作図)



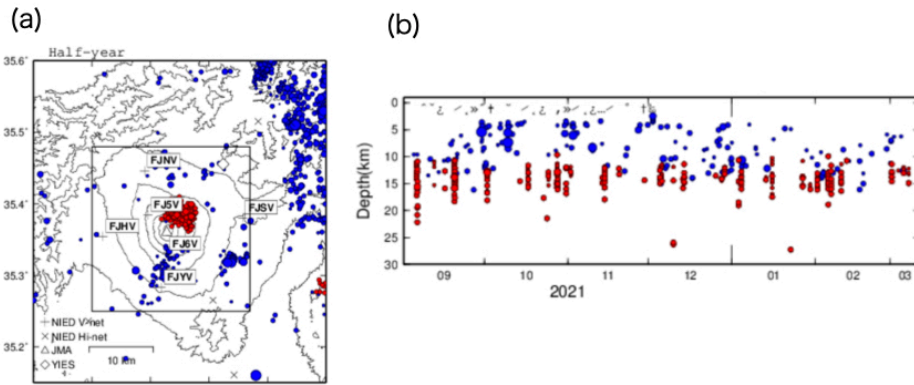
第4図 修正したマグマ供給系モデル



第 5 図 修正したマグマ供給系モデルによるシミュレーション結果の例

結果を統計的に扱うために、マグマ溜まりからの放出を 10000 回発生させ噴出量や噴火発生間隔について調べた。(a)積算噴出量(全体),(b)積算噴出量(一部拡大),(c)地表に到達した噴火での噴出量の頻度分布,(d)同じく噴火間隔の頻度分布,(e)マグマ溜まりからの放出量の頻度分布,(f)同じく放出間隔の頻度分布。

マグマ溜まりからは平均 30 年周期でマグマが放出されているが(f), 噴火未遂に終わることも多く, 地表での噴火間隔はずっと時間間隔が広がっている(d). マグマ溜まりの変形による浮力項を入れたことによって, 噴出量が一桁程度大きな噴火がたまに起きるようになった(b,c).



第 6 図 富士山の地下で観測されている地震の時空分布(2021 年 9 月～2022 年 3 月中旬)(防災
 科研火山活動連続観測網 VIVA ver.2 より)

(a)空間分布, (b)深度と発生時期. 山頂直下深さ 20km 程度から深さ 10km 程度まで何かが頻繁に移動しているが噴火の発生には至っていない. 火山噴出物の分析からはマグマ溜まり深度でマグマが揮発性成分に飽和しているとは考えにくく, マグマ溜まりから上昇開始したマグマが経路途中で上昇力を失って固結し, その際に放出されたガス成分の移動を地震観測が捉えている可能性がある.

階段図(供給率変化)とマグマ供給系

山元孝広¹

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1. Email: t-yamamoto@aist.go.jp

1. はじめに

階段図で示されたマグマ噴出量の時間変化は、多様で一定ではない(Yamamoto *et al.*, 2018). これを理解し、火山活動の中長期予測へと結び付けるためには、マグマ供給系とマグマ溜まり形成プロセスに関する知見が不可欠である. 本講演では、近年発展したこの分野における研究成果をレビューし、そこから構築された階段図をどのように解釈するべきか試論を紹介する.

2. マグマ供給系

マグマ供給系 (magmatic system) は, Sparks *et al.* (2019) に従えば, メルトが支配的なマグマ, メルトを結晶間に分散して含むマッシュ, マグマ熱の移動・マグマ起源流体の流入・マグマによる応力の影響を受ける母岩の 3 つの物理領域からなる. メルトが支配的な領域がマグマ溜まり (magma chamber), マグマ領域とマッシュ領域を含んだものがマグマ貯留層 (magma reservoir) と定義されている. マッシュではレオロジ的にロックされた結晶集団が骨格を形成し, メルトは結晶間のネットワークとして分布しているものと考えられている. また, マッシュに含まれるメルトの量は, ごくわずかなものから, 50%程度の高いメルト分率まで, 大きく変動することがある. 噴火可能な領域はマグマ溜まりであり, マッシュがそのまま噴火することはない.

噴火履歴から示されたマグマ噴出量の時間変化は, このような階層構造を持つマグマ供給系の変化を反映したものである. 例えば, 那須茶臼岳火山では過去 18 千年間にマグマ組成の大きな変化はなく, 噴出量が時間と共に小さくなる傾向がある (Ban and Yamamoto, 2002). このケースは, 単独のマグマ溜まりの時間変化で説明できる. これに対して, 富士火山の過去 2.3 千年間のマグマは組成の変動が大きく, 噴出量も一定しない (Yamamoto *et al.*, 2021). この変化を単独のマグマ溜まりで説明することは困難であり, マグマ貯留層内に大きさの異なる複数のマグマ溜まりが存在する系を考える必要がある. さらに大山火山では過去 200 千年間にマグマ噴出率の増減に対応したマグマ組成変化が認められ, マグマ供給系深部での母岩領域に対するマグマ流入量の変化が噴出量に現れたと解釈されている (Yamamoto and Hoang, 2019). 階段図から火山活動の中長期予測を目指す上では, このような供給系の階層構造の違いを考慮する必要があるだろう.

3. 巨大マグマ溜まり

マグマ溜まり形成の主要な問題の一つは空間問題で, 大量のマグマを蓄積するためには母岩を変

形させてスペースを確保する延性的なメカニズム、熱的に成熟した有効粘性の低い壁岩の存在が必要である。熱モデルは、地殻下部における長期のマグマ注入 (10^5 年から 10^6 年のタイムスケール) が、地殻上部のマグマ溜りの発達と維持を促進することを示している (Karakas *et al.*, 2017)。一方で、成熟した地殻であっても、マグマの注入速度が速すぎると、溜りの壁が脆く破壊され、噴火に至ることになる (Caricchi *et al.*, 2014)。従って、マグマ注入速度が低すぎても、高すぎてもマグマの大量蓄積には適さず、巨大マグマ溜りの形成には最適条件が存在する (Degruyter and Huber, 2014)。最近の巨大噴火間期におけるマグマ溜りの成長の数値モデリングは、マグマ溜りが $\sim 10^{-4} \sim 10^{-2}$ km³/年の速度で非線形的に成長し、マグマ溜りが小さい時期には遅く、大きくなってから加速度的に発展することを示している (Townsend *et al.*, 2019)。

Degruyter and Huber (2014) の重要な成果は、噴火の頻度がマグマの注入 (τ_{in})、冷却 (τ_{cool})、粘性緩和 (τ_{relax}) のタイムスケールに依存することを示し、これらのタイムスケールと噴火頻度を関連付けるスケーリング則を開発したことにある。上記の 3 つのタイムスケールから、2 つの独立した無次元量を特定することができる。

$$\theta_1 = \tau_{cool} / \tau_{in}$$

$$\theta_2 = \tau_{relax} / \tau_{in}$$

θ_1 はマグマ注入による熱供給と地殻への伝導による熱損失の比であり、ペクレ数として捉えることができる。また、 θ_2 は粘性緩和時間尺度と注入時間尺度の比で、デボラ数として捉えることができる。巨大噴火を起こした始良カルデラ入戸噴火前、阿蘇カルデラ阿蘇 4 噴火前、十和田火山大不動・八戸噴火前のマグマ噴出量時間変化を用いてカルデラ形成噴火前のマグマ溜り条件を推定すると、いずれのケースでも θ_2 が 1 以下、 θ_1 が 1 以上となり、数値モデリングで示されたマグマ溜りの加速度的成長が可能な最適条件にあった可能性がある。

引用文献

- Ban, M., Yamamoto, T., 2002. Petrological study of Nasu-Chausudake Volcano (ca. 16 ka to Present), northeastern Japan. *Bull. Volcanol.*, **64**, 100–116.
- Caricchi, L., Annen, C., Blundy, J., Simpson, G., and Pinel, V. (2014). Frequency and magnitude of volcanic eruptions controlled by magma injection and buoyancy. *Nature Geoscience*, 7(2), 126–130. <https://doi.org/10.1038/ngeo2041>
- Degruyter, W., and Huber, C. (2014). A model for eruption frequency of upper crustal silicic magma chambers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **403**, 117–130. doi:10.1016/j.epsl.2014.06.047
- Karakas, O., Degruyter, W., Bachmann, O., and Dufek, J. (2017). Lifetime and size of shallow magma bodies controlled by crustal-scale magmatism. *Nature Geoscience*, **10**(6), 446–450. <https://doi.org/10.1038/ngeo2959>
- Sparks, R.S.J., Annen, C., Blundy, J.D., Cashman, K.V., Rust, A.C., Jackson, M.D., 2019. Formation and dynamics of magma reservoirs. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.*, **377**,

20180019.

Townsend, M., Huber, C., Degruyter, W., and Bachmann, O. (2019). Magma Chamber Growth During Intercaldera Periods: Insights From Thermo-Mechanical Modeling With Applications to Laguna del Maule, Campi Flegrei, Santorini, and Aso. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **20**(3), 1574–1591. <https://doi.org/10.1029/2018gc008103>

Yamamoto, T., Hoang, N., 2019. Geochemical variations of the Quaternary Daisen adakites, Southwest Japan, controlled by magma production rate. *Lithos*, **350–351**. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105214>

Yamamoto, T., Kudo, T., Isizuka, O., 2018. Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan. *Earth, Planets Space*, **70**. DOI: 10.1186/s40623-018-0849-x

Yamamoto, T., Nakano, S., Ishizuka, Y., 2021. Temporal variations of magma composition, eruption style and rate at Fuji Volcano, Japan. *Earth, Planets Space*, **73**. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01505-1>

階段図を用いたマグマ活動の評価指標の提案

伊藤順一¹

1:産業技術総合研究所 地質調査総合センター

〒305-8567 つくば市東 1-1-1 産総研つくば中央第7 itoh-j@aist.go.jp

1. はじめに

内閣府は、火山防災として取り組むべきテーマの一つとして「噴火予測・前兆現象の評価」を示し、解決すべき技術的課題として「中長期的(今後 100 年間程度以内)に起こりうる噴火の可能性の評価に有効な指標の作成」を掲げている。今後の施策・研究の充実を進める上で「優先度を付けた計画的な調査研究」の検討に向け、「階段ダイアグラム」(噴火年代-噴出物量積算図、以下では階段図と略す)を活用したマグマ噴出率の長期的変化の評価指標を提案する。

2. 噴出物量階段図に基づくマグマ噴出率の算定方法

2.1 階段図の問題点

階段図は、過去の噴火イベント(あるいは噴火ユニット)に対する噴火年代と噴出物量(の積算値)をグラフ化したもので、マグマ噴火の規模と噴火時期の規則性を一望することができる。このことから、階段図を噴火の予測や評価に活用することへの期待は高く、マグマ溜りへの応力とマグマ供給系の関係性からのモデル化(例えば, Bacon, 1982; 小山・吉田, 1994; Miura *et al.*, 2013 など)や、マグマ溜りの岩石・化学的進化との関連性からの検討(Yamamoto *et al.*, 2018 など)、確率論を用いたモデル化の検討(Garcia-Aristizahal *et al.*, 2012; Gunn *et al.*, 2014 など)等が行われている。

一方、階段図を用いた精緻な検討を行う上では、階段図の元データ(噴火年代と噴出物量)に誤差や不確実性が存在することに注意を払う必要がある。噴火年代値には、機器分析により生ずる測定誤差だけでなく、測定手法や試料により同一の噴火イベント堆積物に対する年代値が収束しなかったり、¹⁴C 年代測定に対する較正暦年代が幅を持って示されるといった不確実性を有する。また、噴出物量の精度は地質調査のきめ細かさに依存するだけでなく、噴火後に生ずる様々な二次的作用(風化・浸食・削剥・埋積・特に大規模な山体崩壊などのイベントによる欠損)の影響を被っており、不確実性が大きい。しかも、これらの誤差や不確実性の程度は、イベント堆積物毎に(すなわち階段図のステップ毎)に一定ではなく、階段図の形からどの様な規則性を見いだすかに大きな影響を与えていることが多い。このことから、マグマの活動性を比較するための指標化に向けて、階段図の形状を直接的に利用すること現時点では難しい、と考える。そこで、階段図の元データ(年代値や噴出物量)の誤差や不確実性を包括する“平均的な”マグマ噴出率を求め、これを指標として利用するのが現実的と考える。

2.2 マグマ噴出率を求める評価期間の設定

数十万年に及ぶ火山噴火履歴の解析に基づく階段図を見ると、元データに誤差や不確実性が存在することを考慮したとしても、階段図の屈曲や、明確な噴火休止期が見られる場合がある。そのような大局的な時間変遷を示すために、階段図データを特定の年代幅で区分し、それぞれの分画毎のマグマ噴出率から活動変遷を示した研究成果が Yamamoto *et al.*(2018)により公表されている。

Yamamoto *et al.* (2018)では、29 の活火山に対する階段図データを 1×10^x , 2×10^x , 5×10^x ($x=1 \sim 5$) 年間隔で区切り、それぞれの分画毎のマグマ噴出率を示す事で活動変遷を示した。この方法は、活動年代が遡るほど噴火イベントの時間分解能が低下するという、地質調査をベースとする階段図データの特徴を上手く反映した方法といえる。その反面、分画する年代幅を統一した為に、分画期間内に収まらない噴火ユニットに対しては案分等の措置が必要となっている。

火山活動史・山体形成史を構築するにあたっては、顕著な活動休止期間の存在や、活動様式・噴火中心の変化、あるいは、噴出物の岩石学的特徴等に基づき「火山活動期」(“火山ステージ”・“噴火ステージ”等の名称が用いられる事もある)の区分がなされる。火山活動期がマグマ供給系の改変に関連すると考えられる事例も存在しており、マグマ活動の変遷を記述する上で「火山活動期」は重要な基本単位と考えられる。また、火山活動期単位のマグマ噴出量は、詳細な階段図が描かれない場合でも、火山体形成史を解明した研究報告等に示されることが多く、原時点においても(一次近似値とはいえ)多くの活火山に対して入手可能なデータである。一方、同一の火山活動期内にも、特徴的な活動休止期や階段図の屈曲等により、活動期を細分する“サブステージ”が定義される場合がある。特に、「最新のサブステージ」は現在の火山活動から直近の将来につながる火山活動として、マグマ活動を評価する上では重要な指標となると考えられることから、もう一つの基本単位とした。「火山活動期」および「最新のサブステージ」の2つを基本単位として、それぞれのマグマ噴出率を比較することで、現在の活動が長期的な活動変遷のなかで活発化の過程にあるのか？あるいは沈静化に向かいつつある状況であるか？を示す事も可能となる。

2.3 最新の火山活動期と最新サブステージのマグマ噴出率算定

前節に基づき、最新の「火山活動期」の活動期間と総噴出量に基づく”平均的マグマ噴出率 (Average Magma Eruption Rate: AR)”と、それに内包される”最新のサブステージに対するマグマ噴出率 (Latest Substage's Eruption Rate: SR)”を求めることとした。また、火山毎にマグマ噴出率は桁の位で大きく変化することから指数化する事とし、マイナス値となることを避けるために定数「4」を加えたものを換算値として用いる。換算式は[式1]のとおりである。(平均的マグマ噴出率, 最新サブステージのマグマ噴出率の[式1]による換算値は、それぞれ AR', SR' として表記する)

$$AR' \text{ および } SR' = \log(\text{評価期間中のマグマ噴出量 [単位: km}^3 \text{ DRE]} \div \text{評価期間 [単位: 1000 年]}) + 4 \cdots [\text{式 1}]$$

なお、加算定数を「4」とした根拠は、国内の活火山で求められる最小のマグマ噴出率が $x \times 10^{-4}$ ($\text{km}^3 \text{ DRE/ky}$) となるものがある為である(次節および Table1 参照)。また、AR' に対する SR' の比の値 (SR'/AR') を、最新サブステージが火山活動期の中で活発化あるいは沈静化の傾向にあるかを示

す指標値とし、この値をAR'に加算することで、対象火山のマグマ活動性指標(Recent Magma Activity Index:RI)とした [式 2].

$$\text{マグマ活動性指標 (RI)} = \text{AR}' + (\text{SR}'/\text{AR}') \cdots [\text{式 2}]$$

3. 国内の活火山への試用結果

3.1 使用した階段図データ

国内の活火山に対するマグマ活動性指数を求めるにあたり、既存文献を用いて火山毎の最新火山活動期およびサブステージのマグマ噴出率を整理した。山元(2014)による階段図データを多くの火山で利用したが、最新の公表文献による活動期区分や、噴火年代、噴出物量に基づき、噴火年代、噴出量を再整理した。今回の取り纏められた活火山 58 座に対する最新の火山活動期ならびにサブステージの定義、それぞれの噴出量と活動期間を根拠文献と共に第1表にまとめた。

3.2 国内活火山のマグマ活動性指標の試算

取り纏めた活火山 58 座に対する最新の火山活動期及びサブステージの活動期間および噴出物量の関係を第 1 図(a)(b)に示す。また、平均的マグマ噴出率の頻度分布を第 2 図に示した。平均的マグマ噴出率の大半は $10^{-3} \sim 10^1 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$ の範囲にあり、中央値はおおよそ $10^{-1} \text{ km}^3 \text{ DRE /ky}$ となった。これは従来から日本列島の活火山の平均的マグマ噴出率とされていた値と調和的である。各火山に対する平均的マグマ噴出率と最新サブステージのマグマ噴出率の相関図を第 3 図に示し、それにマグマ活動度指数(RI 値)の等値線を重ね合わせたものを第 4 図とした。なお、[式 1][式 2]によって得られた火山毎の換算値 (AR', SR') およびマグマ活動性指数(RI)を第 2 表にまとめている。

[式 2]による指標化では、平均的マグマ噴出率がほぼ同等であっても、最新のサブステージにおいてマグマ噴出率の高い火山ほど、現在マグマ噴火が活発化傾向にあるとされ、より大きな RI 値で示されている。例えば、大雪山、三宅島、浅間山の AR はおおよそ $3 \times 10^{-2} \text{ km}^3 \text{ DRE /ky}$ であるが、RI 値では、浅間山は 4.63、三宅島 4.45、大雪山 3.53 となる(第 4 図、第 2 表)。

ここで、火山噴火予知連絡会による活火山のランク付けや常時観測火山と RI 値との関係を確認すると、常時観測火山に認定されていない活火山の中で、RI 値が比較的高い値を示すものがいくつか確認される(例えば、摩周火山、燧ヶ岳、利尻山、羊蹄山、榛名山など)。常時観測火山の選定においては、過去数十年程度の間での噴火実績や 100 年以内の間隔での噴火の繰り返し、また地震・地殻変動等の火山の活発化等に基づき選定がなされている(噴火予知連 活動評価検討会, 2009)、摩周火山を始めとするこれらの火山は、歴史時代特に近代の観測情報が無いことから、常時観測体制の強化選定過程において、優先順位が低く評価されたものと考えられる。

また、気象庁の活火山のランク区分と RI 値の相関性を見ると(第 4 図)、全般的な傾向として A ランクの火山ほど RI 値が高く、C ランクの火山ほど RI 値が低い傾向がある。しかし、個々の火山に着目すると、RI 値が低くとも A ランクとされている火山(例えば十勝岳)や、RI 値が高くとも B ランク(例えば富士山、摩周)や C ランク(燧ヶ岳)とされている火山も存在する。活火山のランク区分では、噴火履歴

や火山観測データから複数項目のデータが収集され、それらに基づき1万年活動指数と100年活動指数を求めた上でランク区分が行われた(林・宇平, 2008). マグマ噴出量についても, 過去1万年間の最大規模および100年間の噴出量が指標算定に利用されている(林・宇平, 2008). しかし, 最近100年間に噴火発生が確認されていない火山では, 100年活動指数と今回算定した最新サブステージのマグマ噴出量との相関性が悪い. 活火山の近年のマグマ噴火を代表する指標を得るあたって, 最近100年間という評価期間は短すぎる可能性を検討する必要があるのではないかとと思われる.

4. まとめ

火山活動期とそれを細分するサブステージを元に, 活火山の活動性評価に資する指標の一つとして, マグマ活動性指数(RI)を提案した. 今回提示した指標(RI 値)では, 評価期間として火山活動期やそのサブステージのマグマ噴出率を用いることで, 噴火イベント毎の変動やデータの不確実性を包括した上でマグマ噴火規模の推移特性を反映することを目指したもので, 現在の火山活動に繋がる“マグマ噴火発生の潜在的な能力”を示すことができたのではないかと考える. 本発表において, 是非ご批判・ご意見いただきたい.

なお, 今回の試算結果は, 原時点で利用できる主に公開文献に基づいているが, トレンチ調査や豊富な年代測定データに基づく精緻な火山噴火史の構築ならびに階段図整備が進んでいる現状においては, 最新知見を反映し, 火山活動期やサブステージの再定義も含め, マグマ活動性指数は更新される必要があると考える.

本文の引用文献

- Burt, M. L., Wadge, G. and Scott, W. A (1994) Simple stochastic modelling of the eruption history of a basaltic volcano: Nyamuragira, Zaire. *Bull. Volcanol.*, **56**, 87-97.
- Garcia-Aristizabal, A., Warner, M. and Eisuke, F. (2011) A Brownian model for recurrent volcanic eruptions: an application to Miyakejima volcano (Japan). *Bull. Volcanol.*, **74**(2), 545-558.
- Gunn, L. S., Blake, S., Jones, M. C. and Rymer, H. (2013) Forecasting the duration of volcanic eruptions: an empirical probabilistic model. *Bull. Volcanol.*, **76**:780. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0780-8>
- 林 豊・宇平幸一 (2008) 最近一万年間の火山活動に基づく火山活動度指数による日本の活火山のランク分けについて. 験震時報, **71**, 59-78.
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol71p059.pdf>
- 火山噴火予知連絡会 火山活動評価検討会 (2009) 中長期的な噴火の可能性の評価について-監視・観測態勢の充実等の必要な火山の選定-. https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/hyoka/hyoka_houkoku.pdf
- 小山真人・吉田 浩 (1994) 噴出量の累積変化からみた火山の噴火史と地殻応力場. 火山, **39**, 177-190.

Miura, D., Miura, D., Arai, K., Toshida, K., Ochiai, T., Tanaka, M. and Iida, T. (2013) Eruption history, conduit migration, and steady discharge of magma for the past 50,000 yr at Esan volcanic complex, northern Japan. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **125**, 1503–1519.

Yamamoto, T., Kudo, T. and Ishizuka, O. (2018) Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan. *Earth Planets Space*, **70**. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0849-x>

※ マグマ噴出率算定に用いた文献は第 1 表の末尾に纏めて記した.

第1表 国内活火山の最新活動期, サブステージのマグマ噴出率の整理

| 火山名 | ※ | 最新の火山活動期 | | | | 注記 | 最新サブステージ | | | | |
|--------|---|-------------------|--------------|------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 噴出量 (km3, DRE) | 活動期間 (ka) | マグマ 噴出率 | 噴出量・年代 引用文献 | | 噴出量 (km3, DRE) | 活動期間 (ka) | マグマ 噴出率 | 噴出量・年代 引用文献 | 注記 |
| 摩周 | | 28.30 | 7.64 | 3.7E+00 | 山元 (2014) | 中央火口丘形成期 (Ma-0)の平均噴出率。噴火年代は、岸本ほか(2009)、山元ほか(2010)に基づく。 | 3.06 | 1.70 | 1.8E+00 | 噴出量・岸本ほか(2009)年代・山元(2014) | Ma-c以降の噴出物層序が明確な火砕物のみサブステージ区分はなされておらず、Ma-d (ca. 4 ka)~Ma-c (1.7ka)の休止期が長いことから、細分した。 |
| アトサスプリ | ○ | 3.80 | 10.00 | 3.8E-01 | 山元 (2014) | 新規アトサスプリ火山 I-II (勝井ほか, 1986)。ただし、中島火山噴出物は除外した。 | | | | | |
| 雌阿寒岳 | ○ | 3.30 | 12.00 | 2.8E-01 | 山元(2014) | 中マツシネリおよび阿寒富士の活動のみを算定。 | 1.79 | 2.00 | 9.0E-01 | 山元(2014) | 阿寒富士(AS-1)の噴出以降のマグマ噴出率 |
| 大雪山 | ○ | 9.70 | 34.00 | 3.0E-01 | 石毛・中川(2017) | 御鉢カルデラ形成以降、3.4万年間の旭岳サブグループ(後旭岳、熊ヶ岳を含む)の平均マグマ噴出率(石毛・中川, 2017)。 | 0.20 | 3.50 | 5.7E-02 | 佐藤・和田(2007) | 佐藤・和田(2007)が、旭岳の活動史をステージ区分した内、最新マグマ噴火(Stage 2)のマグマ噴出率を示す(Stage 3は水蒸気噴火のみとされる)。 |
| 十勝岳 | ○ | 2.30 | 60.00 | 3.8E-02 | 山元(2014) | 石塚ほか(2010)による、新規(Y-1及びY-2)の平均マグマ噴出率 | 0.13 | 4.70 | 2.8E-02 | 石塚ほか(2010) | 新規(Y-2)の内、5千年前から現在までのマグマ噴出率 |
| 利尻山 | | 9.00 | 38.00 | 2.4E-01 | Taniuchi (2022) | 石塚(1999)による後期活動(L-1, L-2)に相当、年代と噴出量は、Taniuchi (2022)による。 | | | 1.2E-01 | Taniuchi (2022) | 石塚(1999)による後期活動の最新サブステージ(L-2)に相当。噴出率はTaniuchi (2022)による。 |
| ニセコ | | 1.48 | 30.00 | 4.9E-02 | 山元(2014) | ニセコ火山群は、NEDO(1986)により噴火年代がほぼ得られている。最新の活動は、約3万年前から活動が始まったイワオヌプリ火山の平均マグマ噴出率を算出。 | | | | | |
| 羊蹄山 | | 9.40 | 40.00 | 2.4E-01 | 江草ほか(2003) | 江原ほか(2003)より、羊蹄山は5万年前以降、大さく(古羊蹄山・新羊蹄山)に区分される。4万年前から始まった新羊蹄山の平均マグマ噴出率を算出。 | 0.28 | 7.00 | 4.0E-02 | 江草ほか(2003) | 江原ほか(2003)による、新羊蹄山は3つの活動期に区分される。最新活動として、第3期のマグマ噴出率を算出 |
| 樺前山 | ○ | 6.00 | 9.00 | 6.7E-01 | 古川・中川(2010) | 古川・中川(2010)より、樺前火山は9ka以降、3つの活動期に区分される。それらの全平均マグマ噴出率を算出。 | 4.50 | 2.50 | 1.8E+00 | 古川・中川(2010) | 第2活動期以降のマグマ噴出率を算出 |
| 倶多楽 | ○ | 0.04 | 14.50 | 2.8E-03 | 噴出量・森泉(1998)年代・Goto & Danhara (2011) | クッタカルデラ形成期の活動期(登別ステージ)の内、最新のマグマ活動である日和田山溶岩ドーム形成(森泉, 1998)以降の平均マグマ噴出率を算出。 | | | | | |
| 有珠山 | ○ | 7.28 | 45.00 | 1.6E-01 | 山元(2014)および古川(未公表) | 菅原ほか(1981)の噴火順序に基づき、洞爺火砕流噴出以降(中島火山、ドンコ山スコリア丘、有珠山)の平均マグマ噴出率を算出 | 1.92 | 0.36 | 5.3E+00 | 古川(未公表) | 1663年以降のマグマ噴出物 |
| 恵山 | ○ | 0.50 | 8.89 | 5.6E-02 | 古川(未公表) | Mura et al (2013)に基づき、完新世以降の平均マグマ噴出率を算出 | | | | | |
| 北海道駒ヶ岳 | ○ | 3.83 | 20.00 | 1.9E-01 | 噴出量・吉本ほか(2008)年代・勝井ほか(1989) | 勝井ほか(1975)によるII期(駒ヶ岳岩層なだれ)以降の平均マグマ噴出率を算出 | 1.40 | 0.37 | 3.8E+00 | 噴出量・吉本ほか(2008) | 勝井ほか(1975)によるIV期(西暦1640年)以降のマグマ噴出率 |
| 恐山 | | 23.14 | 270.00 | 8.6E-02 | 小林ほか(2011)および山元(2014) | 荒川ほか(2008)による後カルデラ火山(宇智利カルデラ形成以降)の噴火年代等を小林ほか(2011)が認定し、山元(2014)がマグマ噴出量を算出した。 | 0.10 | 120.00 | 8.3E-04 | 小林ほか(2011)および山元(2014) | 荒川ほか(2008)による後カルデラ火山の内、火砕流活動期後の剣山活動期(200ka)から開始し、80ka以降のマグマ噴出率を算出 |
| 八甲田山 | ○ | | 100.00 | 1.6E-02 | 工藤ほか(2004) | 工藤ほか(2004)によると、北八甲田火山群の過去40万年間の平均マグマ噴出率は0.04 km ³ /kaであるが10万年スケールで減少傾向。ここには10万年前以降のマグマ噴出率を示す。 | | | 2.0E-03 | 工藤ほか(2003) | 工藤ほか(2003)に基づき、最新期(6kaから3.1ka)以降は水蒸気噴火ステージに移行のマグマ噴出率を示す。 |
| 十和田 | ○ | 59.76 | 61.00 | 9.8E-01 | 工藤(2023) | 工藤(2023)に基づき、61kaから始まったカルデラ形成期以降の平均的マグマ噴出率を算出 | 11.04 | 15.70 | 7.0E-01 | 工藤(2023) | 工藤(2023)に基づき、八戸火砕流噴出以降のPostカルデラステージ(15.7ka)以降のマグマ噴出率を算出 |
| 岩木山 | ○ | 37.24 | 300.00 | 1.2E-01 | 噴出量・山元(2014) | 佐々木ほか(1996)に基づき、岩木山のマグマ噴火の開始を約30万年前とし、その間の総噴出量(山元, 2014)に基づき、平均マグマ噴出率を算定。 | 0.23 | 50.00 | 4.6E-03 | 噴出量・伴ほか(2012) | 伴ほか(2012)より、最新の活動(第3期)を約5万年以降の山頂溶岩ドーム形成期とし、その間の噴出量から算定。 |
| 秋田焼山 | ○ | 9.90 | 500.00 | 2.0E-02 | 噴出量・Umeda et al (2013)年代・山崎・南(2023) | 大場(1991)により、3つの活動期に大別される。古期の活動は、山崎・南(2023)に基づき50万年前から開始したものとして算定。 | | | | | |
| 八幡平 | | 1.20 | 200.00 | 6.0E-03 | 大場・梅田(1999) | 大場・梅田(1999)による、八幡平火山群の最新の火山(前森山火山)の平均噴出率を算定。山体平均比重1.5、DRE換算比重2.5と仮定。噴火年代は中央値を用いた。 | | | | | |
| 岩手山 | ○ | 1.06 | 9.00 | 1.2E-01 | 噴出量・伊藤(未公表)年代・伊藤ほか(2018) | 最新期の火山ステージ(美師岳火山)の平均的マグマ噴出率を算定。 | 0.05 | 1.11 | 4.5E-02 | 伊藤(未公表) | 美師岳火山ステージの内、To-a以降の平均噴出率 |
| 秋田駒ヶ岳 | ○ | 2.90 | 10.00 | 2.9E-01 | 噴出量・Umeda et al (2013)年代・和知ほか(1997) | 藤縄ほか(2004)による、後カルデラ期(生保内火砕流)によるカルデラ形成以降の噴出物(AK11以降の噴出物)を対象として算定した。 | | | | | |
| 鳥海山 | ○ | 3.90 | 20.00 | 2.0E-01 | 噴出量・Umeda et al (2013)年代・伴ほか(2001) | 林(1984)によるステージⅢ(中央火口丘活動期)から平均マグマ噴出率を算定した。 | 0.60 | 2.49 | 2.4E-01 | 噴出量・Umeda et al (2013)年代・光谷(2001) | 林(1984)によるステージⅢ(中央火口丘活動期)に相当。噴出量はDREに換算。活動年代は、光谷(2001)による象潟DAの発生年代に基づき、2020年を起点として再計算した。 |
| 栗駒山 | ○ | 0.20 | 8.00 | 2.5E-02 | 噴出量・Umeda et al (2013)年代・土井(2012) | 藤縄ほか(2001)による最新の火山体(剣岳火山体)の平均噴出率 | | | | | |
| 鳴子 | | 0.10 | 4.50 | 2.2E-02 | Umeda et al (2013) | 中央火口丘(沼沼溶岩ドーム)の形成以降を再活動期として算定。 | | | | | |
| 蔵王山 | ○ | | 35.00 | 3.0E-02 | 伴ほか(2015) | 伴ほか(2015)による、御釜・五色岳を形成した最新の活動期(IV期)の平均マグマ噴出率 | 0.10 | 2.00 | 4.9E-02 | 伴ほか(2015)、山元(2014) | 伴ほか(2015)はVI期を噴火休止期により3kサブステージに区分。最新の五色岳火砕岩類活動期(最近2000年間の)平均噴出率を算出。山体構成物は伴ほか(2014)、テフラ堆積は山元(2014)による。 |
| 吾妻山 | ○ | 0.40 | 7.64 | 5.3E-02 | 山元(2014) | 吾妻火山は複数の火山体に区分されているが、山元(2005)により浄土平火山(桶沼ユニット)より上位の平均噴出率を算定 | | | | | |
| 安達太良山 | ○ | 7.60 | 230.00 | 3.3E-02 | 噴出量・山元(2014)年代・藤縄ほか(2001) | 藤縄(1980)による最新の第3期の平均マグマ噴出率を算定。 | 1.21 | 120.00 | 1.0E-02 | 山元(2014) | 山元・飯口(2000)により、府テフラ層序による第3期を細分した最新のサブステージ(G-3)期(テフラ)以降の噴出物の平均噴出率を算定した。 |

第1表の続き

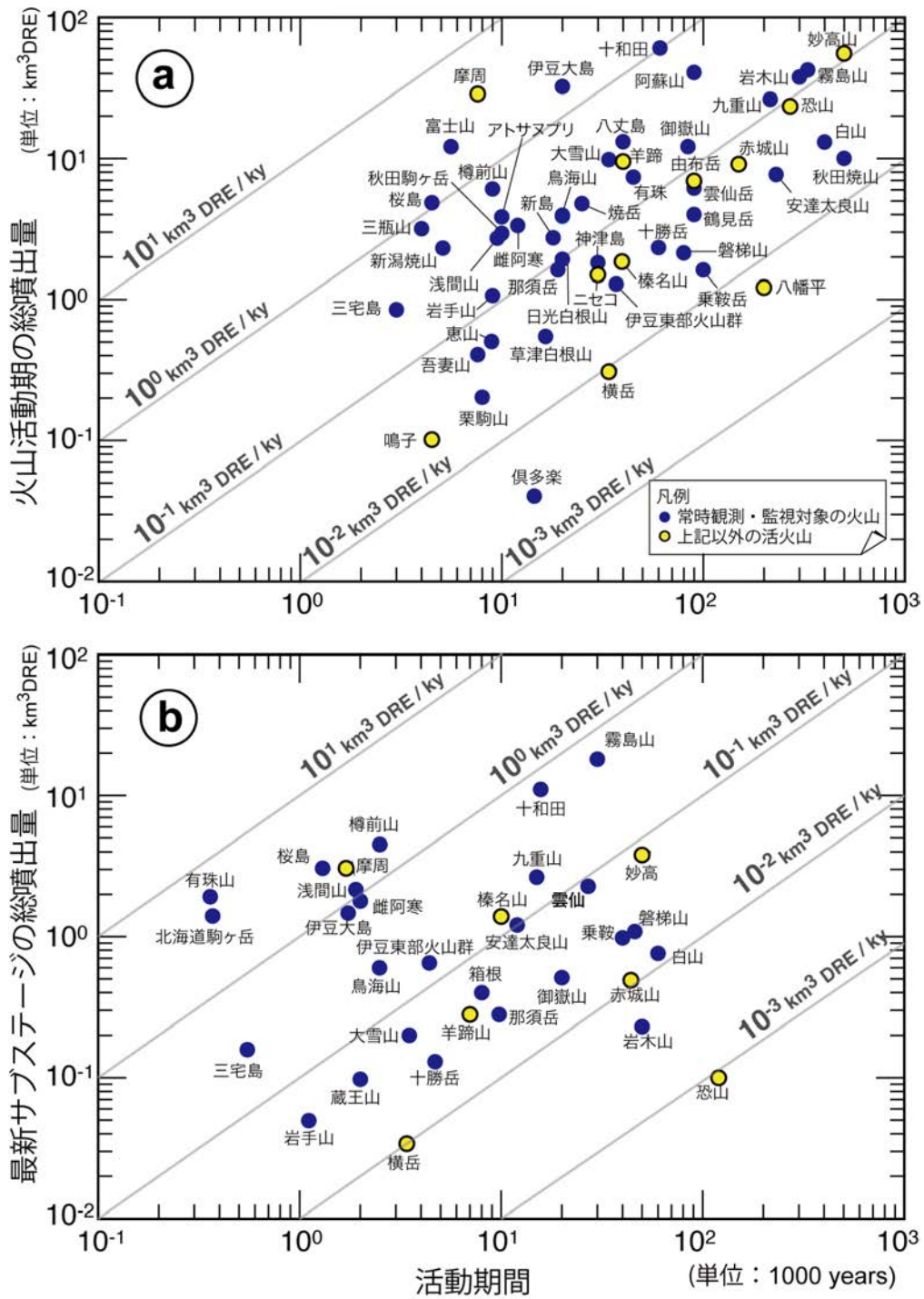
| 火山名 | ※ | 最新の火山活動期 | | | | 注記 | 最新サブステージ | | | | 注記 |
|---------|---|--------------------------------|--------------|------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 噴出量 (km ³ , DRE) | 活動期間 (ka) | マグマ 噴出率 | 噴出量・年代 引用文献 | | 噴出量 (km ³ , DRE) | 活動期間 (ka) | マグマ 噴出率 | 噴出量・年代 引用文献 | |
| 磐梯山 | ○ | 2.11 | 80.00 | 2.6E-02 | 山元(2014)および山元・飯口(2023) | 山元・須藤(1996)による。磐梯火山新期(小磐梯・大磐梯山噴出物および望湖台溶岩)の平均マグマ噴出率を算出した。なお、望湖台溶岩(0.12km ³ ; 山元・飯口, 2023)は見かけ比重1.8, DRE換算比重2.5として算定(0.087 km ³ , DRE)。 | 1.09 | 46.00 | 2.4E-02 | 山元(2014)および山元・飯口(2023) | 磐梯山新期の内、翁島DA発生期以降噴出物(大磐梯山噴出物および望湖台溶岩)の平均噴出率を算出した。望湖台溶岩についてはDRE換算の上で、加算した。 |
| 那須岳 | ○ | 1.60 | 19.00 | 8.4E-02 | 山元(2014) | 山元・伴(1997)に基づき、那須火山群の中で最新の茶臼岳火山(大沢ユニット以降全)での平均マグマ噴出率を算出 | 0.28 | 9.77 | 2.9E-02 | 山元(2014) | 茶臼岳火山の内、最近1万年以内の八幡ユニット以下のマグマ噴出率を算出した。 |
| 日光白根山 | ○ | 1.90 | 20.00 | 9.5E-02 | 草野ほか(2022) | 草野ほか(2022)により、山崎(1958)が記した日光白根山から、蜜塚西火山を不整合で覆う山体が、新たに日光白根山全として再定義されている。なお、三岳山体は含まれていない。 | | | | | |
| 燧ヶ岳 | | | 350.00 | 2.0E-01 | 早川ほか(1997) | 渡邊(1989)は4つの噴火ステージに区分したが、第2期噴出物を成層火山構成物とした。早川(1997)はその内、モーカケ火砕流・七入軽石を約35万年前とし、マグマ平均噴出率が算定されている。比重2.5でDRE換算 | | 10.00 | 4.0E-01 | 早川ほか(1997) | 比重2.5でDRE換算した。 |
| 赤城山 | | 9.00 | 150.00 | 6.0E-02 | 山元(2014) | 竹本(1998)および高橋ほか(2012)による新規成層火山のうち、山元(2016)により区分された「軽石噴火期」および「後カルデラ期」の平均的マグマ噴出率を示す。 | 0.49 | 44.00 | 1.1E-02 | 山元(2014) | 山元(2016)による「後カルデラ期」のマグマ噴出率 |
| 榛名山 | | 1.83 | 39.50 | 4.6E-02 | 山元(2014) | 中村(2005)による「新榛名火山」、下司・竹内(2012)による「新榛名火山」のうち、榛名カルデラの形成後、中央火口丘群の活動期(榛名富士溶岩以降)の平均マグマ噴出率を算定した。 | 1.39 | 10.00 | 1.4E-01 | 山元(2014) | 水沢山溶岩噴出後、早田(1989)による榛名-流川テフラ(Hr-S)以降のマグマ噴出率を算定した。なお、評価期間は水沢山溶岩噴出後(ca.10ka)から現在とした。 |
| 草津白根山 | ○ | 0.54 | 16.50 | 3.3E-02 | 山元(2014) | 早川・由井(1989)による第3噴火期(火砕丘群およびマールの形成期)の内、17ka以降の噴出物(白根山火砕丘から上位)の平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 浅間山 | ○ | 2.68 | 9.46 | 2.8E-01 | 高橋・安井(未公表) | 荒牧が定義した前掛期全体のマグマ噴出率 | 2.16 | 1.90 | 1.1E+00 | Takahashi et al(2022) | Takahashi et al(2022)による、前掛期のサブステージ区分による第III期のマグマ噴出率 |
| 妙高山 | | 54.72 | 500.00 | 1.1E-01 | 山元(2014) | 早津(2008)による最新期(第I~IV活動期)の平均マグマ噴出率 | 3.80 | 50.00 | 7.6E-02 | 山元(2014) | 早津(2008)による第IV活動期の噴出物 |
| 新潟焼山 | ○ | 2.28 | 5.10 | 4.5E-01 | 年代・フェイス・石崎(2022)、噴出量:山元(2014) | 全噴出物。噴出量は山元(2014)。噴火開始年代はフェイス・石崎(2022)を使用 | | | | | |
| 焼岳 | ○ | 4.72 | 25.00 | 1.9E-01 | 及川(2002) | 及川(2002)による。新規焼岳火山群の内、アカンダナ火山・白谷山火山は除く。焼岳火山のみの平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 乗鞍岳 | ○ | 1.60 | 100.00 | 1.6E-02 | 噴出量:山元(2014) | 中野ほか(2015)による「乗鞍岳火山」の内、近年の成果により、10万年以降に形成された権現池・高天火山体および恵比寿火山体・四ツ岳火山体を形成した活動期の平均的マグマ噴出率 | 0.98 | 40.00 | 2.5E-02 | 噴出量:山元(2014) | 中野ほか(2015)による、恵比寿火山体・四ツ岳火山体および剣ヶ峰溶岩から上位の噴出率 |
| 白山 | ○ | 12.93 | 400.00 | 3.2E-02 | 噴出量:山元(2014) | 東野・清水(1985)等により、白山火山群は約40万年前以降に形成された複数の火山体から構成されている。ここでは、加賀室火山を含む火山群全体の平均マグマ噴出率を示す。 | 0.76 | 60.00 | 1.3E-02 | 噴出量:山元(2014) | Hasebe et al(2016)に基づき、大汝峰形成後、6万年以降の活動による噴出物を最新期のサブステージとする |
| 御嶽山 | ○ | 12.00 | 84.00 | 1.4E-01 | 山元(2014) | 山田・小林(1988)の層序区分及び小林(1985)に基づき、新規御嶽火山の内、最新の摩利支天火山群の平均マグマ噴出率 | 0.51 | 20.00 | 2.6E-02 | 山元(2014) | 小林(1985)による摩利支天火山群最新の三ノ池火山および鈴木ほか(2009a, b)による最新期噴出物を含むマグマ噴出率 |
| 横岳 | | 0.30 | 34.00 | 1.0E-02 | Nitta et al(2020) | 河内(1977)により、八ヶ岳火山群の全体層序において、北八ヶ岳火山の最新期の横岳の平均マグマ噴出率を示す | 0.03 | 3.40 | 1.0E-02 | Nitta et al(2020) | Kawachi et al(1978)によるY8溶岩から上位ユニットの平均マグマ噴出率 |
| 富士山 | ○ | 12.00 | 5.60 | 2.1E+00 | Yamamoto et al(2021) | Yamamoto et al(2021)により、須走期の詳細な階段図が得られており、マグマ噴出率に異なる複数のサブステージに細分される。そのうち、須走-bステージ以降の平均マグマ噴出率を示す。 | | | 2.0E+00 | Yamamoto et al(2021) | Yamamoto et al(2021) Fig.2で、階段図屈曲が認められた須走-dステージ内のB2(約1.5ka)以降現在までの分画の平均マグマ噴出率 |
| 箱根山 | ○ | | 58.00 | 9.0E-02 | Kobayashi(2009) | 箱根東京テフラの噴出後、中央火口丘形成ステージの平均マグマ噴出率 | 0.40 | 7.95 | 5.1E-02 | 山元(2014) | 小林(1999, 2003)は2ka以降階段図に屈曲を指摘。神山溶岩ドーム以降の活動を最新サブステージとして算定 |
| 伊豆東部火山群 | ○ | 1.27 | 37.00 | 3.4E-02 | 山元(2014) | 小山ほか(1985)および山元(2014)において、50kaから37kaの間に明瞭な休止期が認められることがあることから、37ka以降を最新活動期として、の平均マグマ噴出率を示す | 0.65 | 4.40 | 1.5E-01 | 山元(2014) | 大室山の活動をもたらした4ka以降の活動を、現在につながるサブステージとしてマグマ噴出率を示す。 |
| 伊豆大島 | ○ | 31.87 | 20.00 | 1.6E+00 | 川邊(未公表) | 川邊(1998)に基づき、先カルデラ火山新期山体の活動を平均マグマ噴出率とした。 | 1.47 | 1.74 | 8.4E-01 | 川邊(未公表) | 川邊(1998)に基づき、カルデラ形成以降の噴出物 |
| 新島 | ○ | 2.70 | 18.00 | 1.5E-01 | 小林ほか(2023) | 小林ほか(2020)、小林ほか(2023)による、赤崎峰火山以降の平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 神津島 | ○ | 1.80 | 30.00 | 6.0E-02 | 村田ほか(2021) | 村田ほか(2021)による、高知山等以降の平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 三宅島 | ○ | 0.84 | 3.00 | 2.8E-01 | 山元(2014) | 津久井ほか(2001)、津久井・川邊(2004)に基づき、八丁平カルデラ形成以後の、雄山期から現在に至る平均マグマ噴出率 | 0.16 | 0.55 | 2.9E-01 | 山元(2014) | 津久井・川邊(2004)に基づき、新滞期以降のマグマ噴出率 |
| 八丈島 | ○ | 13.00 | 40.00 | 3.3E-01 | 山元(2014) | 山元(2014)に基づく西山火山噴火期の平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 三瓶山 | | 3.13 | 4.02 | 7.8E-01 | 山元(2014) | 福岡・松井(2004)により、活動年代に大きな空白期が認められることから、三瓶山第VIIステージから上位の噴出物に対する平均マグマ噴出率を示す。 | | | | | |
| 由布岳 | | 6.84 | 90.00 | 7.6E-02 | 山元(2014) | 小林(1984)によりASO-4より上位とされる山体全体の平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 鶴見岳・伽藍岳 | ○ | 3.95 | 90.00 | 4.4E-02 | 山元(2014) | 小林(1984)によりASO-4より上位とされる山体全体の平均マグマ噴出率 | | | | | |
| 九重山 | ○ | 26.10 | 217.00 | 1.2E-01 | 山崎ほか(2016) | 山崎ほか(2016)に基づき、九重火山群全体の平均マグマ噴出率を示す | 2.70 | 15.00 | 1.8E-01 | 山崎ほか(2016) | 山崎ほか(2016)に基づき、黒岳を含む第4期のマグマ噴出率 |
| 阿蘇山 | ○ | 40.12 | 90.00 | 4.5E-01 | 山元ほか(2014)、宮線ほか(2003) | ASO-4以降、山体構成物は山元(2014)、テフラは宮線ほか(2003)を合算した | | | | | |
| 雲仙岳 | ○ | 6.08 | 90.00 | 6.8E-02 | 山元(2014) | 渡部・星住(1991)より阿蘇-4移行の新規雲仙火山体の平均マグマ噴出率 | 2.28 | 27.00 | 8.4E-02 | 山元(2014) | 普賢岳の噴火活動によるマグマ噴出量 |
| 霧島山 | ○ | 41.80 | 330.00 | 1.3E-01 | Nagaoka & Okuno(2014) | Nagaoka & Okuno(2014)による、霧島(Youngerステージ)の平均噴出率 | 18.10 | 30.00 | 6.0E-01 | Nagaoka & Okuno(2014) | Nagaoka & Okuno(2014)による、霧島(Youngerステージ)の最新サブステージ(Y4)の噴出率 |
| 桜島 | ○ | 4.79 | 4.50 | 1.1E+00 | 下司(未公表) | 南岳の活動による平均マグマ噴出率 | 3.06 | 1.30 | 2.4E+00 | 下司(未公表) | 5世紀以降の噴火 |

※気象庁による常時監視観測対象

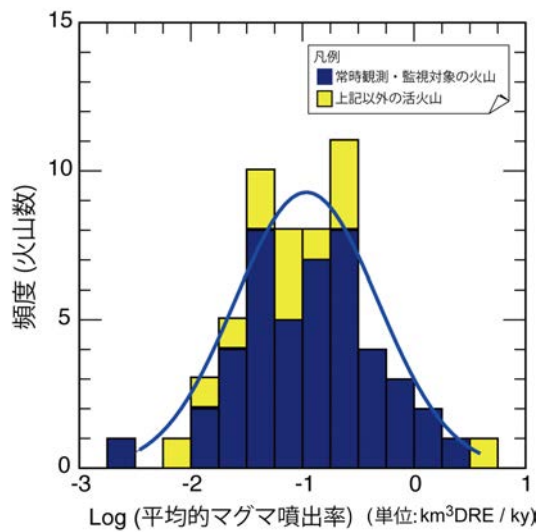
第1表の続き (引用文献リスト)

噴出率データに関する引用文献

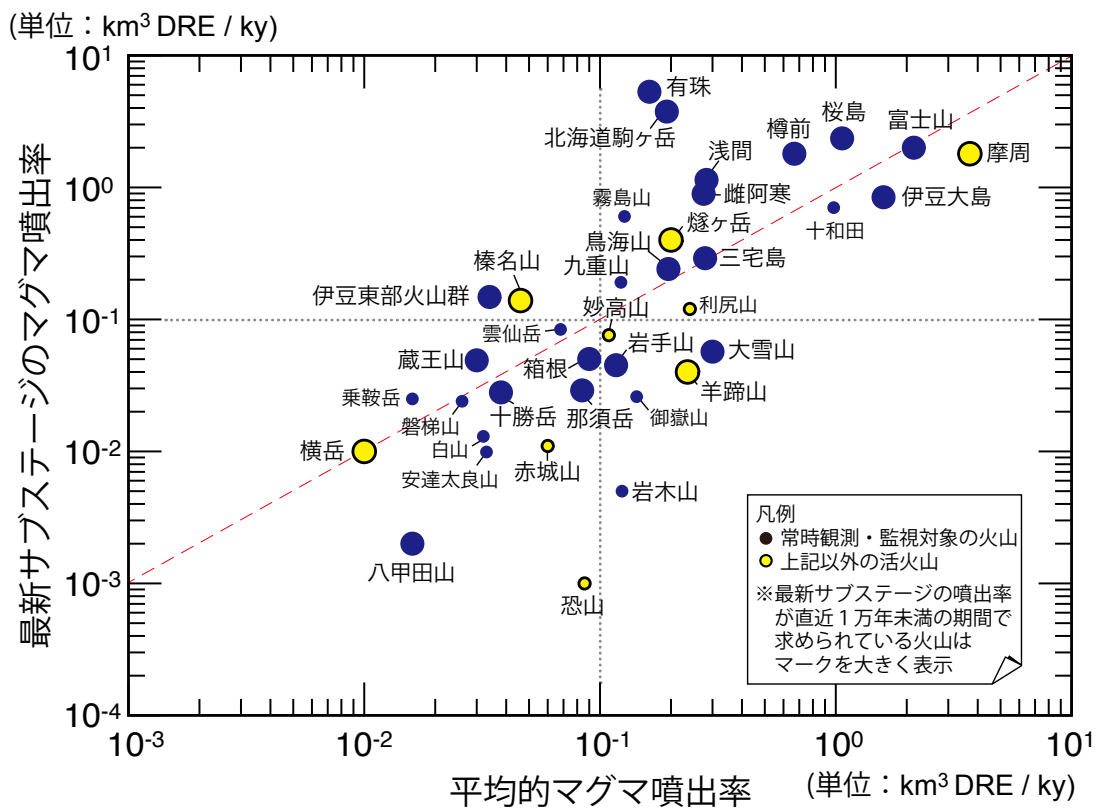
- 荒川 武久・岡島 靖司・水上 啓司・志村 聡・宮脇 理一郎・水瀬 真・小林 淳・吉田 真理夫(2008)北半島、恐山火山の火山活動史: マグマ噴出率、噴火様式等の長期的変化。火山学会予稿集, 16.
- 伴 雅雄・林 信太郎・高岡 直雄 (2001) 東北日本弧。鳥海火山の K-Ar 年代: 連続的に活動した 3 個の成層火山。火山, 46 (6), 317-333.
- 伴 雅雄・及川 輝樹・山崎 誠子 (2015) 蔵王火山地質図。火山地質図(no.18), 産総研 地誌調査総合センター 8 p
- 伴 雅雄・佐々木 実・中川 光弘 (2012) 岩木山の噴火履歴とマグマ発達過程の解明に関する研究。次期火山噴火予知研究計画検討会。
- 江草 匡倫・中川 光弘・藤田 豪平 (2003) 西南北海道。羊蹄火山の活動史: 埋積された古羊蹄火山の発見と噴出率の時間変化。火山学会予稿集, 57.
- 土井 宣夫 (2012) 栗駒山剣岳付近の火砕堆積物の層序と放射性炭素年代。火山学会予稿集, 135.
- ファイブ ウィルダン ムハラッド・石崎 泰男 (2020) テフラ層序からみた最近 5000 年間の新潟焼山火山・妙高火山の噴火履歴。火山学会予稿集, 75.
- 藤縄 明彦・林 信太郎・梅田 浩司 (2001) 安達太良火山の K-Ar 年代: 安達太良火山形成史の再検討。火山, 46 (3), 95-106.
- 福岡 孝・松井 登司 (2004) 三瓶火山の噴火様式の変遷。鳥根県立三瓶自然館研究報告, (2), 9-14.
- 古川 竜太・中川 光弘 (2010) 樽前火山地質図。 (no.15), 産総研地質調査総合センター 火山地質図, 8 p
- 下司 信夫・竹内 圭史 (2012) 榛名山地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅)。産総研地質調査総合センター, 79 p.
- Goto Y. and Danhara T. (2011) Zircon Fission-track Dating of the Hiyoriyama Cryptodome at Kuttara Volcano, Southwestern Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 56 (1), 19-23.
- Hasebe N., Nakano Y., Miyamoto H., Higashino T., Tamura A., Arai S., Kim J. (2016) A multi-geochronological study of the Hakusan volcano, central Japan. Island Arc, 25 (2).
- 早川 由紀夫・由井 将雄 (1989) 草津白根火山の噴火史。第四紀研究, 28 (1), 1-17.
- 早川 由紀夫・新井 房夫・北爪 智啓 (1997) 燧ヶ岳火山の噴火史。地学雑誌, 106 (5), 660-664.
- 早津 賢二 (2008) 妙高火山群-多世代火山のライフストーリー。実業公報社, 424p.
- 東野 外志男・清水 智 (1985) 白山の第四紀の地史。1 白山火山の形成史。白山高山帯自然史調査報告書, 1-10.
- 石毛 康介・中川 光弘 (2017) 北海道中央部。大雪火山群。旭岳サブグループの後期更新世~完新世火山活動史。地質学雑誌, 123 (2), 73-91.
- 石塚 吉浩・中川 光弘・藤原 伸也 (2010) 十勝岳火山地質図。火山地質図 (no.16), 産総研地質調査総合センター, 8 p
- 伊藤 順一・濱崎 聡志・川辺 積久 (2018) 岩手火山における最近 1 万年間の爆発的噴火履歴の再検討: 水蒸気噴火とマグマ噴火の時空間的関連。地質学雑誌, 124 (4), 271-296.
- 勝井 義雄・鈴木 建夫・曾屋 龍典・吉久 泰樹 (1989) 北海道駒ヶ岳火山地質図。火山地質図 (no.8), 地質調査所, 8 p.
- Kawachi S., Nakaya S. and Muraki K. (1978) YPm-IV pumice bed in Northern Yatsugatake, Yatsugatake Volcanic Chain, central Japan - Studies on Yatsugatake tephra Part I - Bull. Geol. Surv. Japan, 29, 21-33.
- 川辺 積久・星住 英夫・伊藤 順一・山崎 誠子 (2015) 九重火山地質図。産総研 地質調査総合センター 火山地質図, 19.
- Kobayashi J. (2009) Study of the eruptive activity of the central cones of the Hakone volcano and its volcanic mechanism volcanic activity in the plate collision field in the northernmost region of Izu-Ogasawara arc. 首都大学東京, 博士(理学), 乙第 5 号.
- 小林 淳 (1999) 箱根火山の最近 5 万年間のテフラ層序と噴火史。第四紀研究, 38 (4), 327-343.
- 小林 淳 (2008) 箱根中央火口丘群の噴火史とカルデラ内の地形発達史-噴火活動と密接な関係を有する地形。神奈川県博調査研報(自然), 13, 43-60.
- 小林 淳・水上 啓治・岡島 靖司 (2011) 恐山北輪山における屏風山・朝比奈岳火山群の年代と火山活動史。火山学会予稿集, 2011, 71.
- 小林 淳・村田 昌則・西澤 文勝 (2023) 新島・神津島-流紋岩マグマがもたらす爆発的な噴火。鈴木毅彦, 市古太郎編著「伊豆諸島の自然と災害」古今書院, 45-68.
- 小林 淳・青木 かつお・村田 昌則・西澤 文勝・鈴木 毅彦 (2020) 伊豆諸島, 新島火山宮塚山イベント以降のテフラ層序と噴火史。火山, 65 (2), 21-40.
- 小林 武彦 (1993) 御嶽火山の活動史と噴出物の体積計測。文部省科学研究費自然災害特別研究報告書「火山災害の規模と特性」, 87-96.
- 小林 哲夫 (1984) 由布・鶴見火山の地質と最新の噴火活動。地質学論集, (24), 93-107.
- 小山 真人・早川 由紀夫・新井 房夫 (1995) 東伊豆単成火山地域の噴火史 2 主として 32ka 以前の火山について。火山, 40 (3), 191-209.
- 工藤 崇 (2023) 十和田火山の積算マグマ噴出量階段図。地調研報, 74 (3), 133-153.
- 工藤 崇・奥野 充・中村 俊夫 (2003) 北八甲田火山群における最近 6000 年間の噴火活動史。地質学雑誌, 109 (3), 151-165.
- 工藤 崇・宝田 晋治・佐々木 実 (2004) 東北日本。北八甲田火山群の地質と火山発達史。地質学雑誌, 110 (5), 271-289.
- 岸本 博志・長谷川 健・中川 光弘・和田 恵治 (2009) 最近約 1 万 4 千年間の摩周火山のテフラ層序と噴火様式。火山, 54 (1), 15-36.
- 草野 有紀・及川 輝樹・石塚 吉浩・石塚 治・山元 孝広 (2022) 日光白根及び三岳火山地質図。火山地質図 (no.22), 産総研地質調査総合センター, 8 p.
- 光谷 拓実 (2001) 自然災害と年輪年代法。"日本の美術 (no.421) 年輪年代法と文化財", 至文堂 編; 東京国立博物館・京都国立博物館・奈良国立博物館 監修, 86-97.
- 宮藤 育夫・星住 英夫・高田 英樹・渡辺 一徳・徐 勝 (2003) 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物。火山, 48 (2), 195-214.
- 村田 昌則・小林 淳・青木 かつお・高橋 尚志・西澤 文勝・鈴木 毅彦 (2021) 伊豆諸島, 神津島における過去 3 万年間のテフラ層序と噴火史。地学雑誌, 130 (3), 379-402.
- 森泉 美穂子 (1998) ムツラ火山群の火山発達史。火山, 43 (3), 95-111.
- Nagaoka S. and Okuno M. (2011) Tephrochronology and eruptive history of Kirishima volcano in southern Japan. Quaternary international, 246 (1), 260-269.
- 中野 俊・大塚 勉・立上 守・原山 智・吉岡 敏和 (2015) 乗鞍岳地域の地質。地域地質調査報告(5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 139 p.
- 中村 庄八 (2005) 群馬県吾妻川流域に分布する浸食された火山の内部と基盤構造。地球科学, 59 (1), 5-24.
- Nitta H., Saito T. and Shitaka Y. (2020) Recent eruption history inferred from eruption ages of the two latest lava flows using multi-dating at Yokodake Volcano, Japan. Earth, Planets and Space, 72 (1), 103.
- 大場 司・梅田 浩司 (1999) 八幡平火山群の地質とマグマ組成の時間-空間変化。岩鉱, 94 (6), 187-202.
- 及川 輝樹・奥野 充・中村 俊夫 (2002) 北アルプス南部、焼岳火山の最近約 3000 年間の噴火史。地質学雑誌, 108 (2), 88-102.
- 佐藤 鋭一・和田 恵治 (2007) 大雪火山群, 旭岳におけるマグマ混合と 3 種類の端成分マグマ。岩石鉱物科学, 36 (5), 125-139.
- 佐々木 実・小川 洋・齋藤 憲二・梅田 浩司 (1996) 岩木山の形成史。火山学会講演予稿集, 165.
- 鈴木 毅彦・千葉 達朗・岸本 博志・岡本 敦 (2009) 御嶽火山の新規活動に関する新知見-マグマ噴火を中心として。日本地球惑星科学連合大会予稿集, J237-005.
- 早田 勉 (1989) 6 世紀における榛名山火山の 2 回の噴火とその災害。第四紀研究, 27 (4), 297-312.
- 高橋 正樹・安井 真也 (2013) 浅間前掛火山のプロキシナル火山地質学及び巡検案内書: 浅間前掛火山黒豆原周辺の歴史時代噴出物。火山, 58 (1), 311-328.
- 高橋 正樹・関 慎一郎・鈴木 洋美 (2012) 赤城火山噴出物の全岩化学組成: 分析データ 381 個の総括。日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, no.47, 341-400.
- Takahashi, M., Yasui, M., Kanamaru, T. and Nakagawa, M. (2022) Eruptive Volume and Age of Large-Scale Pumice Eruptions of the Asama-Maekake Volcano, Central Japan, as Revealed by Detailed Trench Surveys: Implications for Future Volcanic Hazards. Jour. Disast. Res., 17, 1080-1089.
- 竹本 弘幸 (1998) 赤城火山。フィールドガイド日本の火山 1, 関東・甲信越の火山 1, 築地書店, 52-73.
- Taniuchi H. (2021) Long-term evolution of a subduction zone volcano: Geology, petrology, and geochemistry of Rishiri Volcano, southern Kuril Arc, 北海道大学, 博士(理学), 甲第 14364 号
- 津久井 雅志・川辺 積久・新堀 賢志 (2004) 三宅島火山地質図 (no.12), 産総研地質調査総合センター, 8 p.
- 津久井 雅志・新堀 賢志・川辺 積久・鈴木 裕一 (2001) 三宅島火山の形成史。地学雑誌, 110 (2), 156-167.
- Umeda K., Ban M., Hayashi S. and Kusano T. (2013) Tectonic shortening and coeval volcanism during the Quaternary, Northeast Japan arc. Jour. Earth System Science, 122 (1), 137-147.
- 渡邊 久芳 (1989) 尾瀬燧ヶ岳火山の地質。岩鉱, 84, 55-69.
- 渡辺 一徳・星住 英夫 (1995) 雲仙火山地質図。火山地質図(no.8) 地質調査所, 8 p.
- 和知 剛・土井 宣夫・越谷 信 (1997) 秋田駒ヶ岳のテフラ層序と噴火活動。火山, 42 (1), 17-34.
- 山崎 誠子・南 裕介 (2022) 秋田焼山火山古期~中期の感度法 K-Ar 年代測定。日本火山学会秋季大会講演要旨集 (P2-18), 157.
- 山崎 誠子・星住 英夫・松本 哲一 (2016) 九重火山群中西部の発達史-感度法 K-Ar 年代に基づく再検討-。火山, 61, 519-531.
- 山崎 正男 (1958) 日光火山群。地球科学, 36, 28-35.
- 山田 直利・小林 武彦 (1988) 御嶽山地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 136 p.
- 山元 孝広 (2014) 日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図(摩周カルデラ, 屈斜路カルデラ, 阿寒カルデラ, 十勝岳カルデラ, ニセコ火山群, 洞爺カルデラ, 恐山火山, 岩木山火山, 吾妻山火山, 安達太良山火山, 磐梯山火山, 那須岳火山, 赤城山火山, 榛名山火山, 草津白根山火山, 妙高山火山, 新潟焼山火山, 乗鞍岳火山, 白山山, 御嶽山, 箱根山, 伊豆東部火山群, 三宅島火山, 八丈島火山, 由布岳・鶴見岳火山, 阿蘇カルデラ, 雲仙山火山)。地質調査総合センター研究資料集, no.613.
<https://www.gsj.jp/publications/pub/openfile/openfile0613.html>
- 山元 孝広 (2016) 赤城火山軽石噴火期のマグマ噴出率と組成の変化。地質学雑誌, 122 (3), 109-126.
- 山元 孝広・伴 雅雄 (1997) 那須火山地質図。火山地質図 (no. 9), 地質調査所, 8 p.
- 山元 孝広・阪口 圭一 (2000) テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約 25 万年間の噴火活動。地質学雑誌, 106 (12), 865-882.
- 山元 孝広・阪口 圭一 (2023) 磐梯山地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 図幅)。産総研地質調査総合センター, 97 p.
- 山元 孝広・須藤 茂 (1996) テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史。地質調査所月報, 47 (6), 335-359.
- Yamamoto T., Nakano S. and Ishizuka Y. (2021) Temporal variations of magma composition, eruption style and rate at Fuji Volcano, Japan. Earth, Planets and Space, 73169.
- 吉本 宏宏・宮坂 瑞穂・高橋 良・中川 光弘・吉田 邦夫 (2008) 北海道駒ヶ岳火山, 先歴史時代噴火活動史の再検討。地質学雑誌, 114 (7), 336-347.



第1図 (a) 最新の火山活動期の活動期間と総噴出量, (b) 最新のサブステージの活動期間と総噴出量. 気象庁による常時観測・監視対象とされている活火山とそれ以外の活火山のマークを区分した.



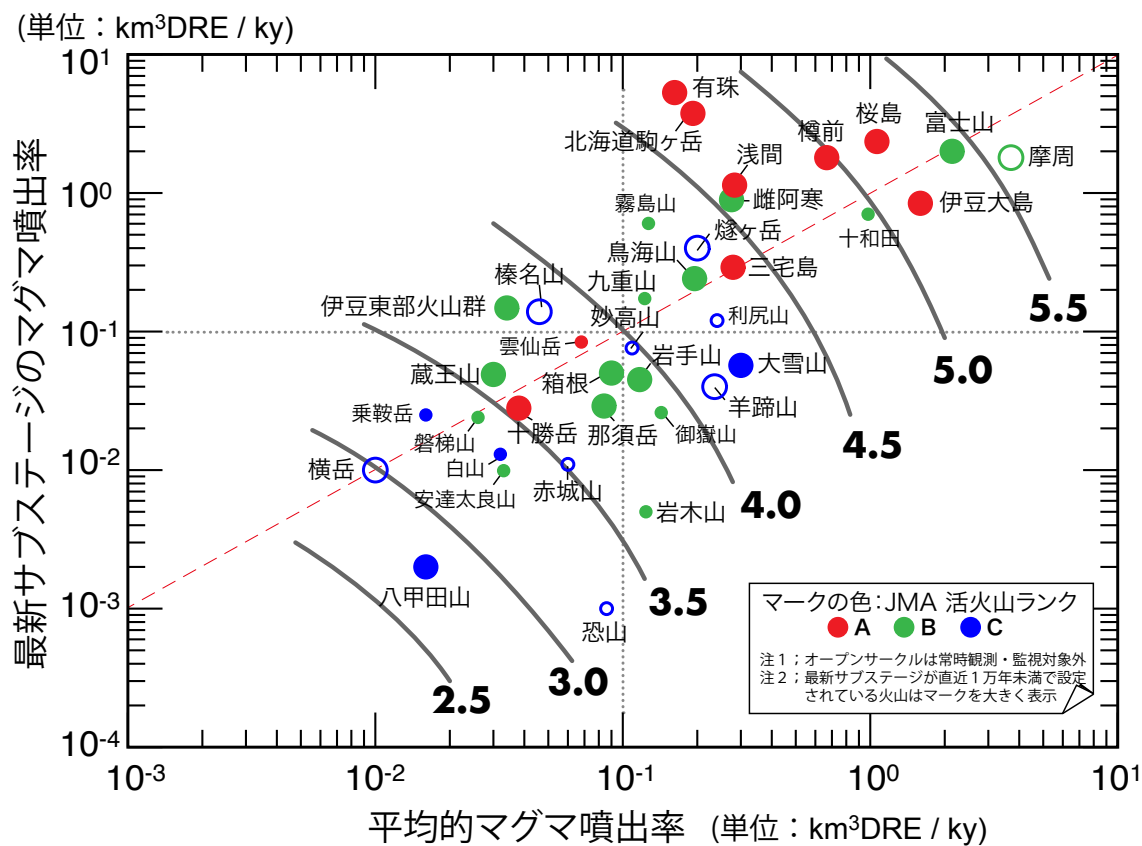
第2図 最新の火山活動期の平均的マグマ噴出率(AR)の頻度分布. 中央値は 10^{-1} ($\text{km}^3 \text{DRE}/\text{ky}$)



第3図 最新の火山活動期の平均的マグマ噴出率(AR)と最新サブステージのマグマ噴出率(SR)相関図. 点線は日本列島の活火山マグマ噴出率の基準値として, 第2図で示された平均的マグマ噴出率の中央値 ($10^{-1} \text{ km}^3 \text{ DRE}/\text{ky}$) を示す. 赤の破線は $\text{AR}:\text{SR}=1:1$ の等値線を示す. この赤の破線より上側にプロットされる火山は, 最新サブステージの活動が長期的な傾向よりも活発化していることを示す.

第2表 火山活動期の平均的マグマ噴出率(AR)と最新サブステージのマグマ噴出率(SR)の指標値
 一覧. 換算式については本文参照. 気象庁による活火山ランクは, 林・宇平(2008)による.

| 火山名 | 火山活動期 | サブステージ | SR' / AR' | マグマ活動性 指標 (RI) | JMA 活火山ランク |
|---------|------------|------------|-----------|-------------------|---------------|
| | Log (AR)+4 | Log (SR)+4 | | | |
| 摩周 | 4.57 | 4.26 | 0.93 | 5.50 | B |
| アトサヌプリ | 3.58 | - | - | - | C |
| 雌阿寒岳 | 3.44 | 3.95 | 1.15 | 4.59 | B |
| 大雪山 | 3.48 | 2.76 | 0.79 | 4.27 | C |
| 十勝岳 | 2.58 | 2.45 | 0.95 | 3.53 | A |
| 利尻山 | 3.38 | 3.08 | 0.91 | 4.29 | C |
| ニセコ | 2.69 | - | - | - | C |
| 羊蹄山 | 3.37 | 2.60 | 0.77 | 4.14 | C |
| 樽前山 | 3.82 | 4.26 | 1.11 | 4.94 | A |
| 倶多楽 | 1.48 | - | - | - | C |
| 有珠山 | 3.21 | 4.72 | 1.47 | 4.68 | A |
| 恵山 | 2.75 | - | - | - | B |
| 北海道駒ヶ岳 | 3.28 | 4.57 | 1.39 | 4.68 | A |
| 恐山 | 2.93 | 1.00 | 0.34 | 3.28 | C |
| 八甲田山 | 2.20 | 1.30 | 0.59 | 2.79 | C |
| 十和田 | 3.99 | 3.85 | 0.96 | 4.96 | B |
| 岩木山 | 3.09 | 1.70 | 0.55 | 3.64 | B |
| 秋田焼山 | 2.30 | - | - | - | B |
| 八幡平 | 1.78 | - | - | - | C |
| 岩手山 | 3.07 | 2.65 | 0.86 | 3.93 | B |
| 秋田駒ヶ岳 | 3.46 | - | - | - | B |
| 鳥海山 | 3.29 | 3.38 | 1.03 | 4.32 | B |
| 栗駒山 | 2.40 | - | - | - | B |
| 鳴子 | 2.34 | - | - | - | C |
| 蔵王山 | 2.48 | 2.69 | 1.09 | 3.56 | B |
| 吾妻山 | 2.72 | - | - | - | B |
| 安達太良山 | 2.52 | 2.00 | 0.80 | 3.31 | B |
| 磐梯山 | 2.41 | 2.38 | 0.99 | 3.40 | B |
| 那須岳 | 2.92 | 2.46 | 0.84 | 3.77 | B |
| 日光白根山 | 2.98 | - | - | - | C |
| 燧ヶ岳 | 3.30 | 3.60 | 1.09 | 4.39 | C |
| 赤城山 | 2.78 | 2.04 | 0.73 | 3.51 | C |
| 榛名山 | 2.66 | 3.14 | 1.18 | 3.84 | C |
| 草津白根山 | 2.52 | - | - | - | B |
| 浅間山 | 3.45 | 4.06 | 1.18 | 4.63 | A |
| 妙高山 | 3.04 | 2.88 | 0.95 | 3.99 | C |
| 新潟焼山 | 3.65 | - | - | - | B |
| 焼岳 | 3.28 | - | - | - | B |
| 乗鞍岳 | 2.20 | 2.40 | 1.09 | 3.29 | C |
| 白山 | 2.51 | 2.11 | 0.84 | 3.35 | C |
| 御嶽山 | 3.16 | 2.41 | 0.77 | 3.92 | B |
| 横岳 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 3.00 | C |
| 富士山 | 4.33 | 4.30 | 0.99 | 5.32 | B |
| 箱根山 | 2.95 | 2.71 | 0.92 | 3.87 | B |
| 伊豆東部火山群 | 2.53 | 3.17 | 1.25 | 3.78 | B |
| 伊豆大島 | 4.20 | 3.93 | 0.93 | 5.14 | A |
| 新島 | 3.18 | - | - | - | B |
| 神津島 | 2.78 | - | - | - | B |
| 三宅島 | 3.45 | 3.46 | 1.01 | 4.45 | A |
| 八丈島 | 3.51 | - | - | - | C |
| 三瓶山 | 3.89 | - | - | - | C |
| 由布岳 | 2.88 | - | - | - | C |
| 鶴見岳・伽藍岳 | 2.64 | - | - | - | B |
| 九重山 | 3.08 | 3.26 | 1.06 | 4.14 | B |
| 阿蘇山 | 3.65 | - | - | - | A |
| 雲仙岳 | 2.83 | 2.92 | 1.03 | 3.86 | A |
| 霧島山 | 3.10 | 3.78 | 1.22 | 4.32 | B |
| 桜島 | 4.03 | 4.37 | 1.09 | 5.11 | A |



第4図 日本の活火山に対する平均的マグマ噴出率(AR)と最新サブステージのマグマ噴出率(SR)の相関図。図中にはマグマ活動性指数(RI)の等値線が重ね合わせて表示されている。ほぼ同一のARを示す火山であっても、最新のサブステージの活発化傾向(SR/AR)が著しいものほどRI値が高くなる。マークの色は、気象庁による活火山のランクによる。

岩石・鉱物学的手法による中長期火山活動予測

下司信夫¹

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1. Email: geshi-nob@aist.go.jp

1. はじめに

火山噴火は地下のマグマ溜まりに蓄積されたマグマが何らかのきっかけで上昇し地表に噴出する現象である。したがって、マグマ溜まりに貯留されているマグマの状態の時間変化を評価し、そこからマグマ上昇のトリガーとなる現象を抽出することができれば噴火の中長期的な推移予測への道が開けるかもしれない。地表にもたらされたマグマである噴出物の岩石学的・鉱物学的解析はマグマ溜まりに貯留されているマグマの状態を直接解析できる手法である。噴出物を用いるこれらの手法は、現在進行している噴火のみならず、過去の噴出物を時系列に従って解析することが可能であり、それにより現在に至るマグマの状態の時間推移の把握と、その未来への外挿による将来予測が期待される。

噴出物の岩石・鉱物の物質科学的な特徴を用いたマグマの状態評価のためには、当然ながら解析対象となる噴出物を入手することが必要であり、そのためには噴火が発生していなければならない。したがって、物質科学的なアプローチによる予測は、完全な噴火の発生予測ではなく、すでに噴火活動が開始している状態においてその活動の推移変化を予測することが目的となる。そしてその対象となる時間スケールは、まず噴火の頻度に強い制約を受ける。なぜならマグマ物質の岩石・鉱物学的特徴を用いた予測では、マグマ噴火の頻度が予測対象の時間スケールよりも十分短く、時間変化のモニタリングに足りる噴火数が得られることが前提であるからである。そのうえで、マグマ溜まりや火道内におけるマグマの状態変化といった火山噴火をコントロールする系のもつ時間スケールや、岩石学的・鉱物学的な解析に要する時間など技術的な制約も受ける。

長期的な活動推移変化の予測の事例としては、活動的なカルデラ火山における巨大噴火の発生可能性の評価があげられる。また短期的な活動推移変化の予測としては、連続的な噴火が発生している火山における突発的な爆発的噴火の発生の予測などがあげられる。本論では、これらタイムスケールの異なる二つの代表的な事例を取り上げ、岩石学的・鉱物学的な解析による火山活動推移予測の事例と課題について考察する。

2. 岩石学的・鉱物学的手法による火山活動状況評価

2.1 マグマ溜まりの進化と活動予測

マグマ溜まりに貯留されているマグマの温度・圧力や結晶度、組成変化などの状態変化を把握することにより、数年～数万年間のタイムスケールでの活動推移予測が試みられている。巨大噴火により大規模な珪長質火砕流を噴出するいわゆるカルデラ火山では、カルデラ形成を伴う巨大噴火で噴出

する大量のマグマがマグマ溜まりに蓄積する準備過程が必要であり、その準備過程において珪長質マグマの形成・蓄積とそれが噴出することができる状態への進化が期待される。

巨大噴火を含むこれらの活動に沿って噴出するマグマの時系列変化は、マグマ供給系の進化過程やそれを反映した岩石学的な特徴の時間変化がみられ、そのマグマの組成や噴出量の変化は噴火履歴・噴火推移に反映されるというモデルが提案されている(Bouvet de Maisonneuve *et al.*, 2021)。このモデルによれば、巨大噴火へのマグマ供給系の発達には地殻深部への苦鉄質マグマの注入と蓄積による地殻の熱的な成熟過程から、地殻の部分熔融によって生じた珪長質マグマが地殻浅部に上昇・蓄積し高結晶度のマグマ溜まり系を形成するステージ、さらに高結晶度マグマ溜まり内部でのメルト成分や揮発性成分の分離と蓄積を経て、集積した珪長質マグマが一度に噴出する巨大噴火に至るとされる。下部地殻への苦鉄質マグマの供給が継続する場合には、巨大噴火後にこの進化過程を繰り返すことにより、数万年の時間間隔を置いて巨大噴火を繰り返す、いわゆる“カルデラサイクル”(Lipman, 1984)が生じるとされる。このサイクルにおいては、初期の苦鉄質～中間質のマグマの散発的・小規模な噴出による小型成層火山などの形成から、次第に珪長質マグマの噴出が卓越するとともに噴出するマグマの分化度の増加、貯留圧力・貯留温度の低下、揮発性成分量の増加などが生じる。巨大噴火直前数千年では特に揮発性成分が濃集した低温のマグマが噴出するが、大規模なマグマ溜まりへのマグマの蓄積によって地表にマグマが噴出する噴火自体の発生頻度は抑制される。そして外的なテクトニック条件の変化や、マグマ溜まりへのマグマの注入などのマグマ溜まり条件の変化などによってマグマ溜まり母岩が破壊されると、陥没カルデラ形成に至る巨大噴火が発生する。Bouvet de Maisonneuve *et al.* (2021)によって検討されたカルデラ火山では、カルデラサイクルの周期は、数千年のもの(Rabaul)から数万年(Campi Flegrei, Okataina)、あるいは数100万年に及ぶもの(Long Valley, Kos-Nisyro)まで提案されている。

このようなカルデラサイクルモデルに基づいて、カルデラ火山における噴出物の時間変化の解析とそれに基づくマグマ供給系の発達過程の推測が行われている。とくに、マグマ溜まり中での揮発性成分の蓄積状態の追跡がカルデラサイクルモデルによるマグマ供給系の進化過程の把握には重要である。Keller *et al.* (2023)は、阿蘇3噴火から4噴火にかけての噴出物の時間変化を典型的なカルデラサイクルとみなし、それらの珪長質噴出物に含まれる燐灰石中の揮発性成分(ハロゲン元素)の濃度変化をマグマ溜まり中における揮発性成分のマーカーとして利用して阿蘇4の巨大噴火に向かうマグマ溜まりの進化を検討した。その結果、阿蘇4噴火に向かいマグマ溜まり中で揮発性成分が濃縮していったこと、あるいはマグマ溜まりの温度が阿蘇4噴火直前に向かって低下したことを明らかにした。このような長期的な噴出物の岩石学的・鉱物学的な変遷を明らかにし、マグマ溜まりの発達過程モデルを適用することによって、カルデラ火山であればそのマグマ供給系が巨大噴火を引き起こすステージにあるのか、あるいは準備段階の早期にあるのかを評価できるかもしれない。

これらの長期的な噴出物の岩石学的な特徴の変化は、噴出物の層序関係やその噴出年代を軸に検討されるべきである。噴出物の層序はそれが整合的に累積している場所であれば問題ないが、噴出物はしばしば分布が地理的に分断されておりその層序関係が把握できない場合も多い。とくに、厚い

溶岩流の場合には相互の層位関係が観察できないことがある。また、定量的な時間スケールの評価のためには、定量的な評価のためには噴出年代の決定が重要である。数万年よりも若い噴出物の年代は炭素 14 法により間接的に測定され、比較的精度よく決定される。しかし、炭素 14 年代測定は溶岩や火砕物そのものの年代を直接測定することができない。また炭素 14 年代測定の事実上の限界である数万年よりも古い噴出物の年代は、K-Ar 法や Ar-Ar 法によって決定されているが、炭素 14 法に比べて劣る測定精度や確度、適用できる試料の種類の問題となる。数万年程度の年代の噴出物の精度の高い直接年代測定方法の開発が望まれる。

2.2 マグマ溜まり—火道系の進化と活動予測

継続的あるいは断続的に噴火が発生している系では、噴出物の経時的なサンプリングにより噴火を駆動するマグマ供給系の状態をモニタリングすることが可能であると期待される。特に、長期にわたり活動が継続している開放型火道を持つ火山では、噴出物の岩石学的・鉱物学的手法によるマグマ供給系のモニタリングが有効であろう。マグマ溜まりや火道への“未分化な”マグマの急速な注入は突発的な激しい噴火活動の引き金となることが考えられるため、このようなマグマ注入を岩石学的・鉱物学的に検知することが噴火予測につながるかもしれない。

現在継続的な噴火活動がみられる Colima 火山(メキシコ)では、過去約 400 年間の活動様式の時間変化から 4 つの活動サイクルが提唱されている。この活動サイクル内ではブルカノ式爆発を伴う溢流的噴火の期間にはほぼ一定の組成の安山岩マグマが定常的に噴出しているのに対し、サイクル末期を特徴づける規模の大きな爆発的噴火活動時には苦鉄質なマグマの注入を受けたマグマが噴出するとされる(Luhr *et al.* 1990)。このようなマグマ供給系の変化とそれに伴う噴火活動の時間推移を予測するため噴出物の継続的なサンプリングと解析が行われている(Reubi *et al.*, 2019)。

マグマ溜まりへの苦鉄質マグマの注入から、マグマ溜まり内の物理化学的条件の変化、そしてそれが反映された実際の噴火活動の変化までのタイムスケールもまた、時間の定量性を持った予測には欠かせない情報である。斑晶鉱物に記録された組成累帯組織がマグマの物理化学的条件の変化を記録していると仮定し、その最も外側に見られる組織境界にみられる化学組成プロファイルを拡散組織と仮定してマグマの物理化学条件の変化から噴出までの時間を推測する試みが広く行われている(たとえば, Lynn and Helz, 2023, Audétat *et al.*, 2023)。

準リアルタイムの噴出物の岩石学的な解析によってより短期的な活動推移のモニタリングも試みられている。エトナ火山(イタリア)では、2020 年から 2021 年にかけて継続した噴火の噴出物を逐次採取し、火山ガラスの化学組成の迅速かつ連続的な解析が行われた。その結果、2020 年 4 月から 11 月までの比較的低調なストロンボリ式噴火は火道浅部で結晶化が進んだマグマによって駆動されていたが、より結晶化が進んでいないマグマが深部マグマ供給系(海面下 5~10 km)から上昇し浅部火道系に注入することによって 2020 年 12 月から 2021 年 1 月にかけて繰り返された突発的爆発的噴火(Paroxysm eruption)が引き起こされたと推測された(Corsaro and Miraglia 2022)。結晶化が進んでいないマグマの浅部火道系への注入によって突発的な爆発的噴火が発生する事例は、ストロンボリ火山

(イタリア)などでも報告されている(Andronico *et al.* 2021). わが国においては, 継続的あるいは断続的な噴火活動は桜島や諏訪之瀬島, 阿蘇中岳など少数の火山に限られるが, こうした火山での連続的な噴出物の採取と, その迅速な岩石学的・鉱物学的解析によって, 未分化マグマの注入などによるより規模の大きな爆発的活動の発生を予測できるかもしれない.

3. 噴出物を用いた噴火予測に向けた課題

噴出物を用いた噴火の可能性の評価のためには, 噴火を駆動するマグマ供給系がどのような物理的・化学的条件を満たせば噴火に至るのかを理解し, その時系列に沿った発達モデルを構築する必要がある. そして, 噴火条件がマグマのもつ岩石学的・鉱物学的な特徴にどのように発現するのかを想定したうえで, 岩石学的・鉱物学的特徴の適切な解析を行うことが必要である. しかし現状では, 噴火発生条件, すなわちマグマ溜まりからのマグマの上昇開始条件については, まだ推測の域を出ていない.

また, 噴出物は火山噴火が発生して初めて地表に噴出し, 解析が可能となる. 従って, 現在進行中の火山活動において噴出物を用いたモニタリングや予測を行うことには原理的な困難がある. 一方, 過去の噴出物の時間変化の追跡により, 予測対象となるようなイベント(大規模な爆発的噴火)に向けてマグマ供給系がどのように変化したかを復元することが可能であろう. この知見を用いて, 現在進行中の火山活動において同様の変化がマグマ供給系に起こった場合に, 噴出物の特徴のみならず, 地球物理学的・化学的にどのようなシグナルが生じるかの予測が可能となる. 岩石学的・鉱物学的手法による“予測”の主要な役割は, このようなマグマ供給系の変化のモデルの提唱と, それに対応した地球物理学的・化学的な観測への指標の提示であると考えられる.

引用文献

- Audétat, A., Schmitt, A.K., Njul, R., Saalfeld, M., Borisova, A. & Lu, Y. (2023) New constraints on Ti diffusion in quartz and the priming of silicic volcanic eruptions. *Nature Communications*, **14**, 4277. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39912-5>
- Andronico, D., Del Bello, E., D’Orlando, C., Landi, P., Pardini, F., Scarlato, P., Vitturi, M. M., Taddeucci, J., Cristaldi, A., Ciancitto, F., Pennacchia, F., Ricci, T. & Valentini, F. (2021) Uncovering the eruptive patterns of the 2019 double paroxysm eruption crisis of Stromboli volcano. *Nature Communications*, **12**, 4213. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24420-1>
- Bouvet de Maisonneuve, C., Forni, F. & Bachmann, O. (2021) Magma reservoir evolution during the build up to and recovery from caldera-forming eruptions - A generalizable model? *Earth Science Reviews*, **218**. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103684>
- Corsaro, R. A. & Miraglia, L. (2022) Near Real-Time Petrologic Monitoring on Volcanic Glass to Infer Magmatic Processes During the February–April 2021 Paroxysms of the South–East Crater, Etna. *Frontier in Earth Science Volcanology*, **10**. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.828026>.

- Keller, F., Popa, R.-G., Allaz, J., Bovay, T., Bouvier, A.-S., Geshi, N., Miyakawa, A. & Bachmann, O. (2023) Variations in water saturation states and their impact on eruption size and frequency at the Aso supervolcano, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **622**, 118400. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118400>.
- Lipman, P. W. (1984) The roots of ash flow calderas in Western North-America: Windows into the tops of granitic batholiths. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8801-8841. doi.org/10.1029/JB089iB10p08801
- Luhr, J. F. & Carmichael, I.S.E. (1990) Petrological monitoring of cyclical eruptive activity at Volcán Colima, Mexico. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **42**, 235-260. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90002-W](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90002-W)
- Lynn, K. & Helz, R.T. (2023) Magma storage and transport timescales for the 1959 Kīlauea Iki eruption and implications for diffusion chronometry studies using time-series samples versus tephra deposits. *Bull. Volcanol.*, **85**, <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01618-9>
- Reubi, O., Blundy, J., & Pickles, J. (2019). Petrological Monitoring of Volcán de Colima Magmatic System: The 1998 to 2011 Activity. In: Varley, N., Connor, C., Komorowski, J.C. (eds) *Volcán de Colima. Active Volcanoes of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25911-1_9

火山性流体観測に基づく活動評価・予測

森 俊哉¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科 地殻化学実験施設

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1. Email: mori@eqchem.s.u-tkyo.ac.jp

6. はじめに

火山性流体は、噴火を含む多岐にわたる火山現象に深く関与しており、火山ガス、噴気ガス、火口湖水、温泉水などとして地表に現れ、火山活動状況の理解と把握において重要な情報源となる。これらの流体は、噴火していない場合でも、火山砕屑物や溶岩とは異なり、地下に存在する物質にアクセスできる点が特異であるとともに、比較的迅速に移動するので地下の現在の状況を捉えることが可能である。火山性流体の観測に基づく活動評価および予測は、火山性流体の化学組成や放出率の時間変化を基にし、これらの変化の背後にある要因を推測しながら行われる。

本稿では、火山性流体を用いた測定や観測に基づく活動評価および予測の現状について概説し、中長期的な評価の展望に関して検討を行う。火山性流体に関わる研究には、固体噴出物中の揮発性成分を対象とするものも存在するが、本稿では、このような噴出物中の揮発性成分には言及せず、火山ガスなどとして地表に噴出した揮発性成分に焦点を絞る。

7. 火山性流体観測による火山活動の評価と予測

火山性流体の観測データが、火山活動の評価および予測において有用であるが、そのほとんどは数か月より短い期間での評価や予測に対応するものである。火山性流体が示す時間変動は、基本的に浅部マグマとその上部に位置する熱水系、およびこれらと地表とを結ぶ移動経路の状況を反映している。このため、浅部マグマだまりよりも深部に存在するマグマだまりでの出来事を抽出することは極めて難しいのが現状である。一方で、火山性流体の化学分析は100年以上の歴史がある(野津, 2016)ものの、研究者が現地へ赴いて採取や観測を行うことが主流となりつつきたため、地球物理学的観測のような高頻度かつ連続的な長期データセットは限られている。このため、様々な火山現象に関連する火山性流体データの蓄積は未だ充分ではなく、現時点で50~100年のタイムスケールの評価に結びつけることは容易ではない。

2.1 火山ガス組成・放出率による評価と予測

Stix (2018)では、噴火を含む一連の火山活動を、地球物理学的または地球化学的に活動の活発化が検出された後、数週間から1年で最大の噴火が発生し、その後同様の時間スケールで急速に活動が減衰していく「早い」活動プロセスと、明確な活発化から1年以上数十年かけてゆっくりと噴火活動期に至り、また数年から数十年かけて静穏期に戻っていく「遅い」活動プロセスに区分し、それぞれ

のプロセスの活動過程や予測方法についてのレビューを行っている。今回のシンポジウムでは中長期の評価・予測に焦点を当てているので、後者の「遅い」活動プロセスに着目する。Stix (2018) では「遅い」活動プロセスの火山活動として、Soufrière Hills 火山, Turrialba 火山, Popocatepetl 火山, Nevado del Ruiz 火山の活動を挙げ、これらの火山は共通して活動度の高い状態が 20 年以上続いていると述べている。

コスタリカの Turrialba 火山に着目すると、1864–1866 年の噴火後静穏期が続いていたが、1996 年 5 月に最初の活発化の兆候となる群発地震が観測され、その後 15 年弱の時間をかけて段階的に活動度を増していき、2010 年 1 月の水蒸気噴火に至っている (Martini *et al.*, 2010; Stix, 2018)。火山性流体の変化を見ると、2000 年までは典型的な低温の熱水系の噴気活動が山頂の噴気地帯で続いていたが、2000 年以降の地震活動の活発化とともに噴気凝縮水の pH の低下がはじまり、噴気ガス中に SO₂ に代表されるマグマ系のガスが加わってくるようになり、噴気ガスの CO₂/SO₂ 比および H₂S/SO₂ 比の減少がみられている (Kern *et al.*, 2002)。二酸化硫黄の放出率は 2002 年にわずかであるが認められるようになり、2007 年までには 70ton/day レベルまで上昇し (Martini *et al.*, 2010)、2008 年には 500–1000ton/day のレベルまで増加し、最終的に 2010 年の噴火へと至っている (Stix, 2018; Kern *et al.*, 2022)。Turrialba 火山で 2000 年以降に見られた火山性流体の組成や放出率の一連の変化は、熱水系ガスが卓越した火山ガスからマグマ性ガスに卓越したガスへと十数年かけて変化していく過程を示している、その後の噴火へとつながっている (de Moor *et al.*, 2016; Stix, 2018; Kern *et al.*, 2022)。

口永良部島では、2014 年 8 月の小規模噴火の約 15 年前から地震活動の活発化が見られ、その後地震活動、地盤変動、地熱活動、火山ガスの変化が段階的進みながら噴火に至っている (井口, 2021)。火山ガスの推移をみると、2003 年ごろからマグマ性のガス成分が噴気ガスに含まれるようになり、その後割合が増加している (平林他, 2007, Shinohara *et al.*, 2011)。二酸化硫黄放出率も、2006 年から測定され、地震活動の活発化や山頂の膨張に呼応して増加がみられた (森・他, 2009, 気象庁 2013)。これらの一連の変化も、Turrialba 火山と同様に火山ガスが熱水系ガスからマグマ性ガスへ変わっていく過程に対応している。熱水系を有する火山では、火山性流体が熱水系からマグマ性へ変わっていく過程が重要なカギであり、このような過程は箱根火山噴火の際にも短期的な変化であるが見られている (Ohba *et al.*, 2019)。熱水系を有する火山が「遅い」活動プロセスで数十年かけて推移していく場合、火山性流体が熱水系からマグマ性へ変わっていく過程を監視することは現在の観測技術でも十分可能であり、地球物理学的観測データと比較しつつ観測事例を蓄積し、活動評価や予測の高度化につなげていくことが重要な課題である。

2.2 希ガスをを用いた評価と予測

火山性流体成分のうち、希ガスの存在量は非常にわずかであるが、マグマ性ガスの関与やその変動を知る上で非常に強力なツールである。これは希ガスが化学的に不活性であり、その同位体組成が非常に精度よく測ることができ、大気、地殻、マントル(マグマ)で特異的な値を持つ (角野他, 2005) の

で、火山活動に伴う変動を敏感にとらえることができるからである。特に、ヘリウムの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の変動は、火山活動評価において有力な指標になりうるとされ、実際に噴火の前兆となる変化も報告されている(Sano and Fischer, 2013, Obase *et al.*, 2022)。比較的長期な変動の例としては、御嶽山 2014 年噴火前において、北西に位置する濁河温泉水中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が約 10 年間にわたり上昇していた(第一図 a)ことが挙げられる(Sano *et al.*, 2015)。この変化は、熱水系へのマグマ性流体の流量が噴火の 10 年前から増加していたと解釈されている(Sano *et al.*, 2015)。また、2021 年に噴火したスペイン・カナリア諸島のラパルマ島 Cumbre Vieja 火山では、鉱泉の気泡ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の時間変化から 2008–2013 年にマントルから島の地殻下(約 25–30 km)へマグマが上昇し、その後 2017–2018 年に Cumbre Vieja 火山下に移動するとともに、2020 年に新たなマグマの注入が深部からあり、2021 年の噴火に至ったと推察されている(Padron *et al.*, 2022)。最近の測定では、草津白根山の北側噴気において、活動の活発化に伴った $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の上昇だけでなく、 $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ ($^{40}\text{Ar}^*$: マグマ起源の ^{40}Ar)の上昇も検出されている(第 2 図)。この変化は、マグマだまりの発泡度の上昇と関連していると解釈されている(Obase *et al.*, 2022)。後半 2 つのような事例は、まだ数少ないが、深部のマグマ溜りへの新たなマグマの注入やマグマだまりの発泡度の変化を希ガス観測で検出できるようになれば、地下のマグマシステムの状況をより詳細にとらえられるようになり、従来よりも長期の活動評価および予測につながる可能性がある。

2.3 土壌ガスを用いた評価と予測

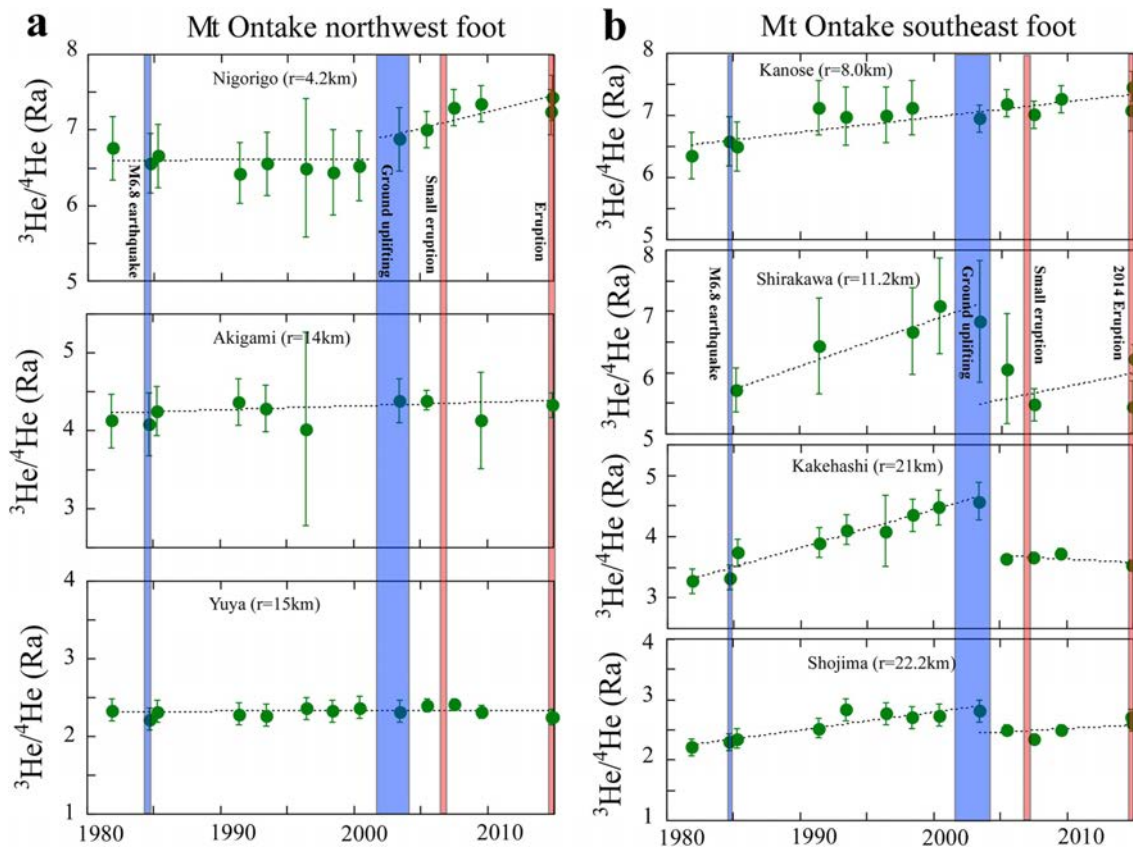
噴気孔や火孔から噴出する火山ガスだけでなく、火山山体の土壌ガスも活動の評価や予測に役立つことが知られている。例えば、有珠山 2000 年噴火の半年前において、山頂域の二酸化炭素拡散放出量の増大しており、これが噴火の前兆的变化として解釈されている(Hernandez *et al.*, 2001)。また、二酸化炭素の拡散放出の面的な調査は、火山性流体の移動経路となる山体や火山周辺の埋没断層や亀裂の検出に有効であることが報告されている(e.g., Giammanco *et al.*, 2010; Morita *et al.*, 2016)。植生が多い山体土壌で、火山性の二酸化炭素の放出が弱い領域では、生物起源の二酸化炭素が相対的に多くなり、これによって深部からの微弱なマグマ起源の情報の有無を二酸化炭素の測定では確認できなくなる場合がある。このような場合、土壌ガス中のヘリウムの同位体組成や生物起源の影響のない水銀フラックスを使って、深部からの流体が上昇してくる場所を探索することも可能である。(寺田他, 2023)。

このような火山性流体が上昇する断層や亀裂の探索は、これらの場所が将来の噴火地点になるのであれば、中長期評価・予測に対して重要な意味を有しうる。しかし、実際にこれらの既存の経路を使用して将来の噴火が発生するかどうかは不明であり、この点については、今後精査が必要である。一方で、これらの場所では、深部での圧力変化に伴う火山性流体フラックス変化を検出できると期待されるので、静穏期において火山性流体が上昇してくる場所を積極的に探索し、把握しておくことは、将来の活動評価に向け、地道ではあるが重要な取り組みである。

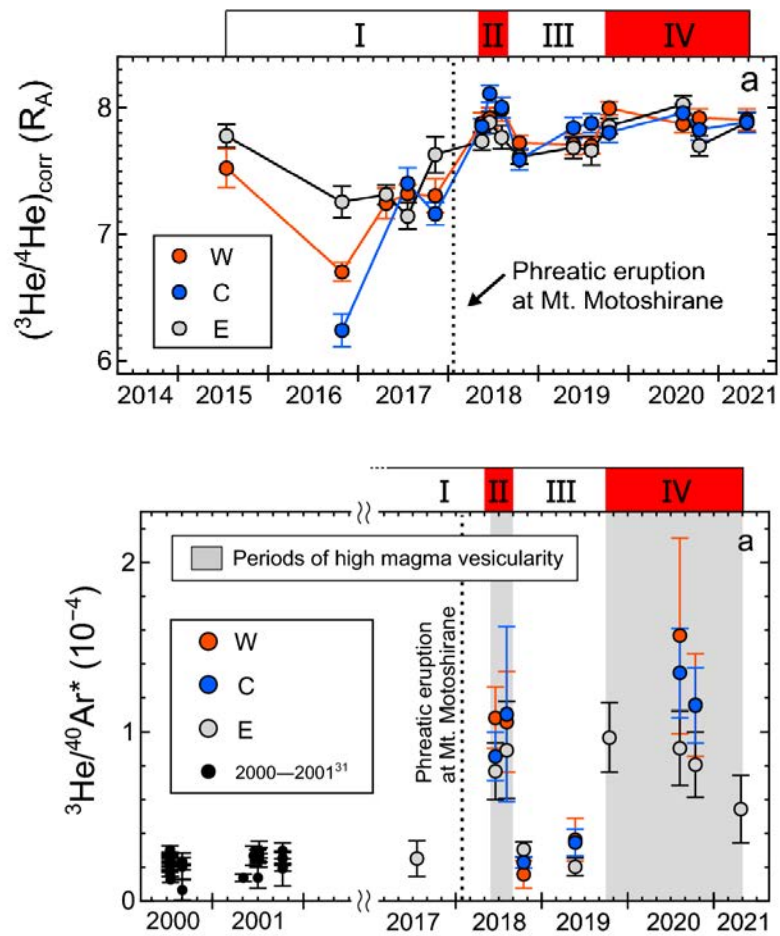
引用文献

- Giammanco, S., Gurrieri, S. and Valenza, M. (1998) Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna (Sicily, Italy). *Bull. Volcanol.*, **60**, 252-259.
<https://doi.org/10.1007/s004450050231>
- Hernández, P.A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Pérez, N.M. (2001). Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, **292**(5514), 83-86.
- 平林 順一, 野上 健治, 大島 弘光, 井口 正人 (2007)火山ガス観測からみた口永良部島の活動状況. 京都大学防災研究所年報 **50 B**, 359-364.
- 井口 正人(2021)2015年口永良部島噴火の火山活動推移と避難の意思決定, 地学雑誌, 130(6), 755-770. <https://doi.org/10.5026/jgeography.130.755>
- Kern, C., Aiuppa, A. and de Moor, J.M. (2022)A golden era for volcanic gas geochemistry?. *Bull. Volcanol.*, **84**, 43. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01556-6>
- 気象庁(2013)火山活動解説資料(口永良部島) 年報.
- Martini, F., Tassi, F., Vaselli, O., Del Potro, R., Martinez, M., Van del Laat, R., Fernandez, E.(2010) Geophysical, geochemical and geodetical signals of reawakening at Turrialba volcano (Costa Rica) after almost 150years of quiescence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **198**, 416-432.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.021>.
- 森 健彦, 風早 康平, 大和田 道子, 下司 信夫, 平林 順一, 横尾 亮彦, 多田 光宏, 神田 径, 為栗 健, 井口 正人, 篠原 宏志 (2009) 口永良部島における二酸化硫黄放出量の計測, 日本火山学会講演予稿集, B24, p. 74. https://doi.org/10.18940/vsj.2009.0_74
- Morita, M., Mori, T., Kazahaya, R. and Tsuji, H. (2016). Diffuse carbon dioxide emissions from hidden subsurface structures at Asama volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **78**, 1-14.
<https://doi.org/10.1007/s00445-016-1008-5>
- 野津 憲治 (2016) 火山ガスの化学分析は世界や日本で誰が最初に行なったか? *火山*, **61**, 253-258. https://doi.org/10.18940/kazan.61.1_253
- Obase, T., Sumino, H., Toyama, K., Kawana, K., Yamane, K., Yaguchi, M., Terada, A. and Ohba, T. (2022) Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases. *Sci. Rep.*, **12**, 17967. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22280-3>
- Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Daita, Y., Sukigara, C., Ito, M. and Tsunogai, U. (2019) Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model. *Earth Planets Space*, **71**, 1-18.
<https://doi.org/10.1186/s40623-019-1027-5>

- Padrón, E., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Sumino, H., Melián, G. V., Alonso, M., Asensio-Ramos, M. and D'Auria, L. (2022). Early precursory changes in the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio prior to the 2021 Tajogaite eruption at Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(18). <https://doi.org/10.1029/2022GL099992>
- Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L. and Fischer T.P. (2015) Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. *Sci. Rep.*, **5**, 13069. <https://doi.org/10.1038/srep13069>
- Sano, Y. and Fischer, T.P. (2013) The analysis and interpretation of noble gases in modern hydrothermal systems. in *Advances in Isotope Geochemistry* (ed. Burnard, P.) 249-317 (Springer Berlin, Heidelberg). https://doi.org/10.1007/978-3-642-28836-4_10.
- Shinohara, H., Hirabayashi, J., Nogami, K., & Iguchi, M. (2011). Evolution of volcanic gas composition during repeated culmination of volcanic activity at Kuchinoerabujima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **202**(1-2), 107-116.
- 角野 浩史, 山本 順司, 熊谷 英憲 (2005) マントル捕獲岩の希ガス研究: 希ガスで探るマントルメタソマティズム, *岩石鉱物科学*, **34** (4), 173-185.
- Stix, J. (2018) Understanding Fast and Slow Unrest at Volcanoes and Implications for Eruption Forecasting. *Front. Earth Sci. (Sec. Volcanology)*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00056>
- 寺田 暁彦, 若松 海, 水谷 紀章, 角野 浩史, 小長谷 智哉, 大場 武, 高橋 昌孝, 谷口 無我, 高橋 祐希 (2023) 草津白根山における側噴火発生危険評価: 土壌ガスの化学的特徴から示唆される火口周辺地下の物質輸送. 日本地球惑星科学連合 2023 年大会要旨, SVC33-10.



第 1 図 御嶽山周辺の採取地点の大気補正した $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の時間変化. この図は Sano *et al.* (2015) の Fig.2 を利用. クリエイティブ・コモンズ・ライセンス表示 4.0 国際(CC BY).



第 2 図 (上図) 草津白根山北側噴気(噴気孔 W, C, E) の大気補正後の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の時間変化。
 (下図) 同じ噴気孔の $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 比の時間変化. 上図は Obase *et al.*, (2022) の Fig. 2 から切り出して利用. 下図は同論文の Fig. 5 から切り出して利用. クリエイティブ・コモンズ・ライセンス表示 4.0 国際(CC BY).

地殻変動観測に基づく活動評価・予測

宗包浩志¹

¹ 国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1. Email: munekane-h96nu@mlit.go.jp

1. はじめに

地殻変動観測に基づく活動評価・予測は、一般的に地殻変動データから求められた地殻変動力源（多くの場合マグマだまりと解釈される）の体積変化に基づいて行われる。地殻変動力源の体積変化が地殻変動力源へのマグマの流入と直接対応すると仮定し、経験則に基づき、体積変化がないかあるいは負の場合はマグマの流入がほぼない、ないしは流出が起きているために噴火の可能性は低く、体積変化が正の場合は、マグマの流入があるので噴火の可能性が高まっていると判断されるのが現状である。

本稿では、地殻変動データのうち、特に GNSS データを用いた地殻変動力源の体積変化の推定手順および体積変化時系列に基づいた活動評価・予測の現状について概観する。

2. 地殻変動データを用いた活動評価・予測について

2.1 火山性地殻変動の抽出

GNSS で得られる地殻変動量には、火山性地殻変動以外にも、プレート運動に伴う地殻変動や地震に伴う余効変動等が含まれている。プレート運動に伴う地殻変動は、空間波長が長いこと、時間的に一定の速度で進展することから、非火山地域のデータから推定した変動の内挿や、火山活動がない時期に推定した変動速度の外挿により補正される(第1図)。一方、地震に伴う余効変動は、地震が遠方で起こった場合には、空間波長が長いために非火山地域のデータから推定した変動の内挿により補正可能であるが、地震が近傍で発生している場合には、空間波長が短いためにそのような取り扱いが不可能であり、粘弾性モデルによる補正と余効すべりの同時推定を組み合わせる必要がある(例えば宗包・小林, 2023)。

2.2 力源パラメータ推定

抽出された地殻変動を用いて力源パラメータを推定する。力源としては、推定を容易にするため、球状圧力源、板状圧力源、回転楕円体(Yang *et al.*, 1988; Cervelli, 2013)、三軸楕円体(Davis, 1986; Nikkhoo *et al.*, 2023)などの、解析解あるいは半解析解が知られているモデルが用いられることが多い。どの力源を仮定するかによって、力源位置や体積変化量に大きな違いが生じるので注意が必要である(第2図)。また、地形の影響、地下構造の影響を正確に見積もるため、有限要素法(例えば Aagaard *et al.*, 2013)が用いられることもあるが、計算負荷が重くモデルパラメータの逆問題による推定

が困難なこと、また、計算に必要となる地下構造の情報が不足していることが多いことからなどから、まだ一般的に活用されているとは言えない。

2.3 体積変化量の時間発展の推定火山性地殻変動の抽出

力源パラメータのうち、力源の位置・形状に関するパラメータは固定し、中・長期的に体積変化を推定する(第3図)。必要であれば、時間的に体積変化が滑らかであるという拘束条件を課して推定を安定させることも行われる。推定には、線形インバージョンやカルマンフィルタなどが用いられる。

中・長期的に体積変化を推定するにあたって様々な課題が指摘されている。そのうちの 하나가、推定期間中に力源が徐々に移動する場合の取り扱いである。その場合、推定期間を区切って力源パラメータ推定を繰り返すことが行われるが(例えば Mattioli *et al.*, 2010)、短期的な変化を知るために推定区間を短く分割しすぎると、地殻変動データの精度が悪くなり、推定が安定しないことが課題である。最近、カルマンフィルタを非線形に拡張し、位置と体積変化を同時に推定する試みもなされている(Yoshinaga *et al.*, 2023)。また、中長期的なタイムスケールでは、岩石の粘弾性の効果が効いてくる可能性がある。例えば球状圧力源の周りを粘弾性体が囲んでいる例では、粘弾性の効果により、噴火後にマグマの流入がない場合でも、噴火時の沈降が継続したり、逆に隆起が起こることが知られている(Segall, 2016)。また、地下構造の粘弾性によっても、同様の現象が起こりうる事が知られている(例えば山崎, 2018)。

2.4 体積変化時系列の解釈

推定された体積変化量は、マグマだまりへの物質のマグマの流出入量と対応すると解釈され、経験的に、体積変化量がほぼゼロないしは負の場合は当面の火山活動が低調である、また正の場合は火山活動が活発になる可能性がある、という解釈がなされることが多い。ただし、測地学的に分かる体積変化量は、マグマの流出量とは必ずしも一致しない。例えば Kazahaya *et al.* (2015)では、浅間山の地殻変動および火山ガス観測から、活動期において、ダイク状マグマだまりの膨張量と同じオーダーで火山ガスの放出によるマグマだまりの収縮があることから、少なくともダイク状マグマだまりの膨張量の2倍以上の深部からのマグマの流入があることを示唆した。また、地殻変動で推定されるのは、あくまで形状を仮定した場合の体積変化量であるが、マグマだまりへの物質の流出入量を評価する場合には、そこからマグマの質量をさらに推定する必要があるが、その際に、マグマの密度とともに、マグマの圧縮性およびマグマだまりの圧縮性を考慮する必要があることに注意が必要である(Segall, 2010)。

また、測地学的に分かる体積変化量だけでは火山活動の評価は経験的なものにとどまらざるを得ない。正確な火山活動の評価には、マグマだまりの形状・大きさやマグマの物性についての情報が必要である。近年 Wong and Segall(2020)は、セントヘレンズ山の2004–2008噴火を題材にして、ドーム形成型の噴火に伴う物理モデルに基づき、地殻変動データに加えて、CO₂放出量、ドーム体積を入力データとし、マグマだまりの形状・体積やマグマの含水率、空隙率などの物性に関して制約を与えることに成功している。

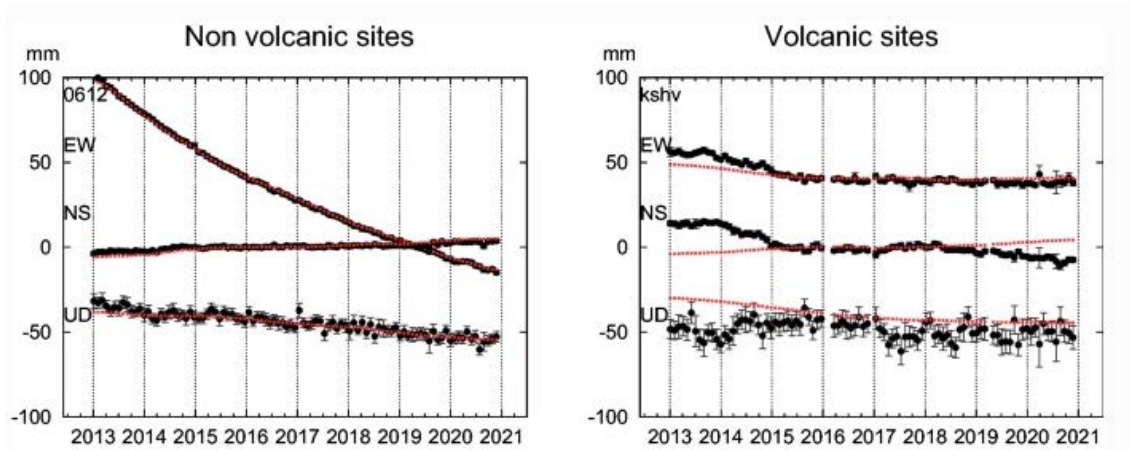
3. まとめと今後の課題

本稿では、GNSS データを用いて地殻変動力源の体積変化を推定する手順および得られた体積変化時系列に基づいた活動評価・予測の現状について現状および課題を紹介した。力源パラメータの推定を行う部分では、特に力源形状の評価と地形や岩石の粘弾性(マグマだまりの周辺や、地下構造)の影響の評価が課題である。また、体積変化時系列による活動評価では、従来行われてきた体積変化量の正負に基づく経験的な評価から脱却するために、多項目観測(ガス観測、噴出物など)データと噴火の物理モデルを組み合わせた評価手法が有望である。今後地殻変動による活動評価の高度化のため上述の課題に取り組むことはもちろんのこと、手法を標準化して、より多くの人が手軽にいろいろな火山に適用できる環境を整備するとともに、現業でも活用できるようにすることが求められる。

引用文献

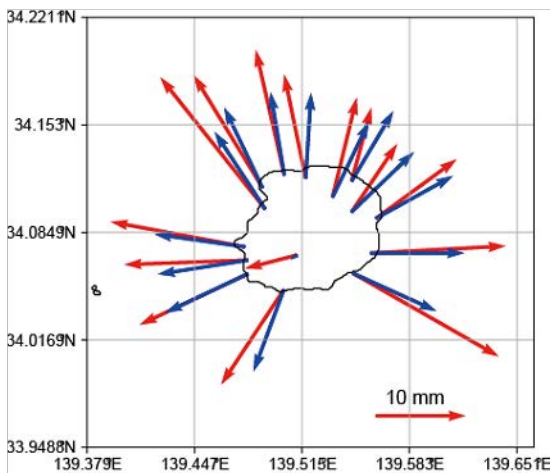
- Aagaard, B.T, Knepley, M.G., and Williams, C.A. (2013) A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasistatic and dynamic crustal deformation. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 3059–3079. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50217>
- Cervelli, P.F. (2013) Analytical expressions for deformation from an arbitrarily oriented spheroid in a half-space. *AGU Fall Meeting Abstracts*, V44C-6.
- Davis, P.M. (1986) Surface deformation due to inflation of an arbitrarily oriented triaxial ellipsoid in an elastic half-space, with reference to Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **91(B7)**, 7429–7438. <https://doi.org/10.1029/JB091iB07p07429>
- Kazahaya, R., Aoki, Y., and Shinohara, H. (2015) Budget of shallow magma plumbing system at Asama Volcano, Japan, revealed by ground deformation and volcanic gas studies. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 2961–2973. <https://doi.org/10.1002/2014JB011715>
- Mattioli, G.S, Herd, R.A., Strutt, M.H., Ryan, G., Widiwijayanti, C., and Voight, D. (2010) Long-term surface deformation of Soufriere Hills Volcano, Montserrat from GPS geodesy: Inferences from simple elastic inverse models. *Geophys. Res.Lett.*, **37**, L00E13. <https://doi.org/10.1029/GL042268>
- Nikkhoo, M and Rivalta, E. (1988) Surface deformations and gravity changes caused by pressurized finite ellipsoidal cavities. *Geophys. J. Int.*, **232**, 643–655. <https://doi.org/10.1093/gji/jjac351>
- Munekane, H., Oikawa, J., and Kobayashi, T. (2016) Mechanisms of step-like tilt changes and very long period seismic signals during the 2000 Miyakejima eruption: Insights from kinematic GPS. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 2932–2946. <https://doi.org/10.1002/2016JB012795>
- Munekane, H. (2021) Modeling long-term volcanic deformation at Kusatsu-Shirane and Asama volcanoes, Japan, using the GNSS coordinate time series. *Earth Planets Space*, **73**, 19. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01512-2>

- 宗包浩志・小林知勝(2023) 2023年熊本地震後に続く阿蘇カルデラ内の沈降は火山起源か? .
2023年度日本火山学会秋季大会予稿集.
- Segall, P. (2010) Earthquake and volcano deformation, Princeton University Press, Princeton. N.J.,
432p.
- Segall, P. (2016) Repressurization following eruption from a magma chamber with a viscoelastic
aureole. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 8501–8522. [https://doi.org/10.1002/
2016JB013597](https://doi.org/10.1002/2016JB013597)
- Yang, X.M, Davos, P., and Dieterich, J.H. (1988) Deformation from inflation of a dipping finite
prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing. *J. Geophys. Res.*,
93(B5), 4249–4257. <https://doi.org/10.1029/JB093iB05p04249>
- 山崎雅(2018)地殻変動からマグマ溜まりを推論する. 地学雑誌, **127**, 111–138. [https://doi.org/
10.5026/jgeography.127.111](https://doi.org/10.5026/jgeography.127.111)
- Yoshinaga, K., Matsushima, T., Shimizu, H., Yamashita, Y., Yamazaki, K., Komatsu, S. and
Fujiwara, S. (1988) Subsurface magma movement inferred from extensometer and tiltmeter
records during the early stage of the 2018 Shinmoe-dake eruptions, Japan. *Earth Planets
Space*, **75**, 143. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01895-4>
- Wong, Y.-Q and Segall, P. (2020) Joint inversions of ground deformation, extrusion flux, and gas
emissions using physics-based models for the Mount St. Helens 2004–2008 eruption *Geochem.
Geophys. Geosyst*, **21**, e2020GC009343. <https://doi.org/10.1029/2020GC009343>



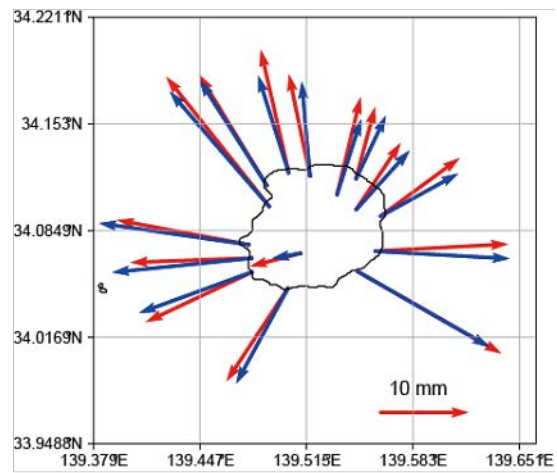
第 1 図 非火山地域の地殻変動の外挿により非火山性の地殻変動を評価した例. 赤線が推定した火山性の地殻変動を表す. データ出典は Munekane(2021)に基づく.

球状圧力源



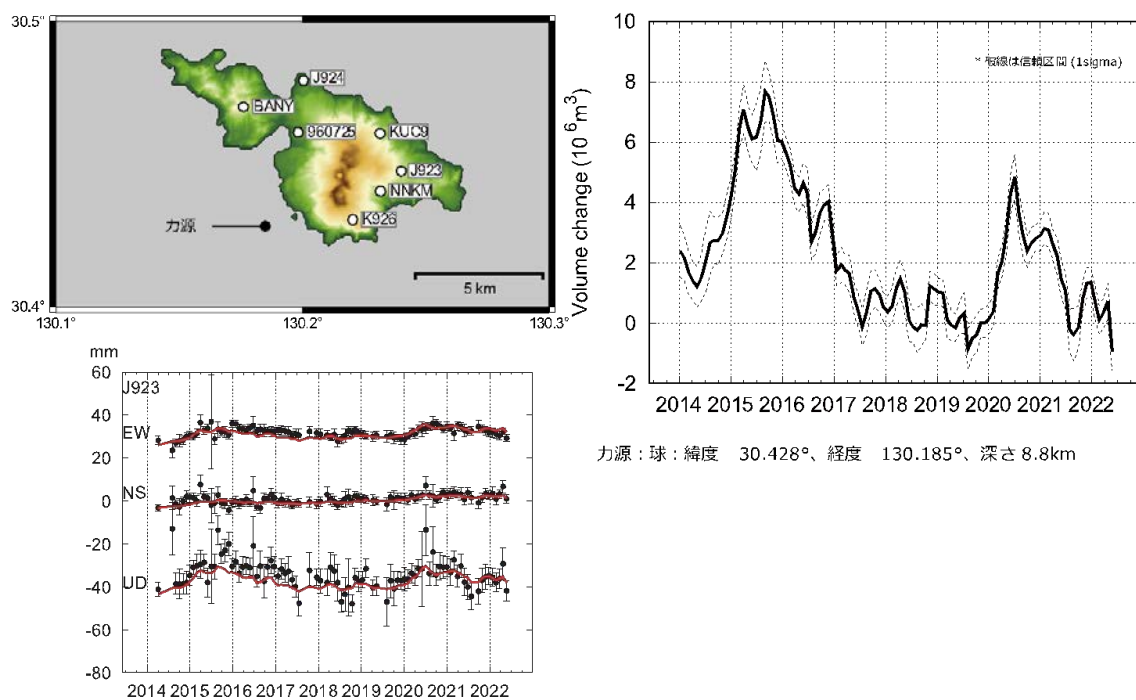
| | |
|--------|----------------------|
| 深さ(km) | $\Delta V(10^6 m^3)$ |
| 5.4 | 3.3 |

三軸楕円体圧力源



| | |
|--------|----------------------|
| 深さ(km) | $\Delta V(10^6 m^3)$ |
| 3.2 | 2.4 |

第 2 図 三宅島カルデラ陥没に伴うステップ変動(Munekane *et al.*, 2016)の変位データを, 力源の形状を変えて推定した例. 左が球状圧力源を仮定した推定結果、右が三軸楕円体を仮定した推定結果. 上図の赤矢印が観測値, 青矢印が計算値を表す.



第 3 図 体積変化時系列の推定例(口永良部島). 左上図が観測点分布, 左下図が観測値(黒)と計算値(赤)の比較、右図が体積変化量を表す.

地震観測等の物理モニタリングに基づく活動評価・予測

青山 裕¹

¹ 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 8 丁目. Email: aoyama@sci.hokudai.ac.jp

1. はじめに

地震観測に基づく活動評価・予測は、震源位置や地震波形の特徴(発震機構の情報を含む)、地震発生頻度などの地震学的な情報と、対象火山における火山活動の特徴や他の物理・化学観測項目に現れている変化を総合的に判断した上で、経験則に基づいて行われるのが一般的である。無人化・連続化がいち早く進んだ地震観測は、多くの火山観測項目の中でも運用の歴史が長いこと、噴火前後の推移を含むデータの蓄積が最も進んでおり、現業官庁における火山活動評価への活用も積極的に行われている。現行の噴火警戒レベルの判定基準の多くに地震活動に関する記述が含まれることは、地震活動に基づく火山活動評価の有効性を示しているとも言えよう。

本稿では、地震観測データから得られる情報を整理するとともに、中長期的なマグマ噴火の可能性評価という観点からモニタリングに関連する先行研究事例とそのアプローチについて概観する。

2. 地震観測データの時空間スケールと火山活動評価・予測

地震観測データが噴火警戒レベル判定のような短期評価・予測に有効であることは、経験的にもよく知られた事実である。しかしながら、地震そのものが地殻内の応力やひずみの急速な変化に起因する現象であるがゆえに、地震現象の時間スケールに比べて遙かに長い時間スケールでゆっくりと進行するマグマ蓄積に関する情報を地震観測データから抽出することは難しく、地震観測と中長期的な噴火可能性評価との親和性は高くない。

その一方で、地震観測データは波動として力学的な情報を伝搬するという性質から、地殻変動データに比べてより深い領域で発生する過渡的な力学的擾乱のモニタリング能力に優れるという特長を持つ。火山性深部低周波地震の発見は、高感度地震観測網の整備がもたらした大きな成果の一つである。火山近傍の下部地殻における力学的な擾乱現象の存在が明らかになっただけでなく、地表での火山活動の活発化(噴火や噴火未遂)に先行した深部低周波地震活動の活発化事例が蓄積されてきた(例えば, Nakamichi *et al.*, 2003)ことから、火山性深部低周波地震とマグマ活動の関連性が火山学業界に広く認識されるようになった。

3. 火山性地震活動発展の概念モデルに基づく火山活動予測

White and McCausland (2019) は USGS の Volcano Disaster Application Program (VDAP) が蓄積した噴火事例等の地震観測データのコンパイルに基づき、マグマ噴火に先行する地震活動を大きく

4段階に分け、火山活動の発展と対比しながら整理して噴火予測の課題を議論した(White & McCausland, 2019 の Fig. 3). 彼らが提示した概念モデルは深部低周波地震活動を起点とするもので、極めて単純化されているものの、現在の地震学的な知見と統合的なイメージと言えよう。マグマだまりへのマグマ蓄積過程までを中長期的な評価対象と考える(マグマだまりからマグマの上昇が始まったら短期評価と位置づける)ならば、彼らが定義した4段階のうちの「①深部低周波地震活動(Deep Seismicity)」と「②広域構造性地震活動(Distal VTs)」が、地震観測に基づく評価対象となる。ここで言う「広域構造性地震活動」とは、マグマだまりの増圧に伴って発生する山体周辺の断層等の既存弱面を震源とする構造性地震活動を指し、火山からの距離はおおむね30kmを超える程度までとしている。

国内の活火山近傍における深部低周波地震活動に関しては、高橋・宮村(2009)が紹介したように一元化震源によって定常的なモニタリングがなされている。しかしながら、深部低周波地震は震源が深くマグニチュードも小さいことから、信号がノイズに埋もれやすく検出自体が難しい。信頼性の高いモニタリングのためにはKurihara and Obara(2021)が導入した相関処理など、微小な信号をとらえるための工夫が必要である。監視対象を全国の活火山に拡げて運用することで、現時点では表面的な火山活動が認められない活火山に対しても中長期的な意味での活動監視・評価に資すると考えられる。気象庁の常時観測火山に指定されていなくとも、深部低周波地震活動度の高い火山が見つかったならば、中長期的な噴火可能性のある火山として位置づけるべきであろう。ただし、深部低周波地震の励起過程については構造性地震のような断層運動を主体とする発震機構が推定されており(例えば、Oikawa *et al.*, 2021)、マグマ供給との物理的な関係性の解明は今後も重要な研究課題である。

広域構造性地震活動は、1990年の雲仙普賢岳噴火に先行する地震活動が世界的にも好例であり、White and McCausland(2019)でも取り上げられている。彼らのコンパイル結果の代表例(White & McCausland, 2019 の Fig. 2)を見ると、噴火の7年ほど前から始まった千々石湾下での地震活動が、世界的に見てもマグマ噴火に長く先行した地震活動事例であることがわかる(その他の主要事例は、2日から3年程度)。雲仙岳の噴火活動当時は深部低周波地震活動の検知能力が高くなかったため、さらに先行するより深部での地震活動を伴っていた可能性は否定できないが、噴火先行現象としての地震活動の時間スケールの上限を示す事例と言えよう。一方で、日本のように地殻ひずみ速度が大きい環境下においては内陸活断層系が著しく発達していることから、広域構造性地震活動については非火山性の地震活動との判別も重要である。火山性である(マグマ蓄積に関係する)と判断する根拠となるのは、地震の発震機構などのほか、他の観測項目に現れる変化との相関性であり、現状では専門家が噴火準備過程のイメージに基づいて主観的に評価している。広域構造性地震活動と地盤変動や後に述べる熱活動モニタリングデータとの相関性を客観的に評価できるようになれば、より確度の高い中長期的な評価につながるだろう。多変量時系列解析を用いた参考となる取り組みが、桜島を研究対象として進められている(基盤研究(B)20H01986、代表:嶋野岳人)。

深部低周波地震の発生域とマグマだまりの間に位置する中部～下部地殻の情報を得ることは、地震観測に残された課題として重要なテーマの一つである。この領域ではいわゆる地震として認識され

るような信号が検出されず、地震活動の情報が得られない地震学的な空白域となっている。しかし、深部低周波地震活動が地震空白域よりも深い部分で検出できるようになった現状を考えれば、今後の観測網の高度化や解析技術の発展により、この空白域においてもマグマの上昇を示唆するような何らかの地震学的情報を得られるようになり、将来的には中長期予測に役立てられるかもしれない。これは全くの私的な希望的観測であり、時間のかかる観測研究として地道に取り組んでいくべき課題である。

4. 地震観測に基づくその他のアプローチ

地震波が地殻内を伝搬するという特長を活かしたモニタリングとして、マグマ噴火に先行した地殻の応力状態の変化を検出する試みもなされてきている。代表的なものは、地震波干渉法を用いた地震波速度変化の検出であろう(例えば, Brenguier *et al.*, 2008)。表面波の伝搬を利用したモニタリングであるため、速度変化の検出が浅い部分に限られることから、噴火直前のダイク貫入など短期評価には活用が期待されるものの、中長期評価への適用可能性は未知数である。最近 V-net 観測点等の地震波データを網羅的に干渉処理するシステムが防災科学技術研究所で構築され、長期の地震波データによるモニタリングが開始された(Hirose *et al.*, 2022)。広域構造性地震活動と比較できるようなタイミングで地震波速度や散乱・減衰の変化が検出される事例(噴火未遂も含む)が蓄積されれば、干渉法モニタリングの中長期的な評価への適用も一歩進むかもしれない。

別の手法として、S波スプリッティングを用いたモニタリングも試みられてきている。マグマ蓄積に伴って山体周辺の地殻応力が変化することにより、地殻内の微小亀裂が変化することで地震波の伝搬特性が変化することを検出するものである。一部の火山では噴火に先行した応力変化を検出したとされるものの(例えば, Gerst and Savage, 2004)、実際には気象要素や近傍での地震活動による影響など、マグマの蓄積による緩やかな応力変化よりもはるかに大きい擾乱の影響を適切に除去した上で解析に臨む必要があり、信頼に足る変化の検出には一層の手法開発が必要な技術と考えられる。

この他にも例えば、地震の積算放出エネルギーや構造性地震の頻度などを入力とした Failure Forecasting と称される経験的な指数法則に基づく噴火予測や、観測データの機械学習に基づく予測の試みなども行われている(Whitehead and Bebbington, 2021)。しかし、これらはいずれも短期予測の時間スケールにある観測データの活用が主であり、本稿がテーマとする中長期予測への拡張性は未知数である。

5. 他の物理観測項目について

最後に、地震観測以外の物理観測による中長期的な活動評価に資する可能性がある研究事例を紹介する。地表熱活動の長期的な活発化は噴火先行現象の一つであるが、明瞭な変化が現れる地点を事前に知り精密な地温観測を連続的に行うことは一般には困難である。地上観測では火口域近傍で磁気測量による熱活動のモニタリングが広く行われているものの、観測点近傍の浅い部分での変化しかとらえられないほか、中長期的な時間スケールになると地磁気の永年変化の影響なども含まれてくるため活用が難しい。Girona *et al.* (2021) は人工衛星 MODIS の赤外熱映像を用い、近年噴火

が発生した世界各地の5火山(御嶽山を含む)において、噴火に数年スケールで先行した山体規模での微弱な温度上昇(1度未満)が検出できることを示した(Girona *et al.*, 2021 の Fig.1). 対象火山を制限することなく継続的に熱活動をモニタリングできる彼らの手法は、数年スケールでの活動評価に活用できる可能性があることに加え、地上観測施設がない火山のモニタリングにも有効であることから、導入する意義は極めて高いと考えられる。

引用文献

- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O. and Nercessian, A. (2008) Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience*, **1**, 126–130.
- Gerst, A. and Savage, M. K. (2004) Seismic Anisotropy Beneath Ruapehu Volcano: A Possible Eruption Forecasting Tool. *Science*, **306**, 1543–1547.
- Girona, T., Realmuto, V. and Lundgren, P. (2021) Large-scale thermal unrest of volcanoes for years prior to eruption. *Nature Geoscience*, **14**, 238–241.
- Hirose, T., Ueda, H. and Fujita, E. (2022) Scattering and intrinsic absorption parameters of Rayleigh waves at 18 active volcanoes in Japan inferred using seismic interferometry. *Bull. Volcanol.*, **84**, 34.
- Kurihara, R. and Obara, K. (2021) Spatiotemporal Characteristics of Relocated Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath 52 Volcanic Regions in Japan Over an Analysis Period of 14 Years and 9 Months. *J. Geophys. Res.*, **126**, e2021JB022173.
- Nakamichi, H., Hamaguchi, H., Tanaka, S., Ueki, S., Nishimura, T. and Hasegawa, A. (2003) Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency beneath Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophys. J. Int.*, **154**, 811–828.
- Oikawa, G., Aso, N. and Nakajima, J. (2021) Depth Dependent Focal Mechanisms of Volcanic Deep Low-Frequency Earthquakes in Northeast Japan. *J. Geophys. Res.*, **126**, e2021JB022666.
- 高橋浩晃・宮村淳一 (2009) 日本列島における深部低周波地震の発生状況. 北大地物報告, **72**, 177–190.
- White, R. A. and McCausland, W. A. (2019) A process-based model of pre-eruption seismicity patterns and its use for eruption forecasting at dormant stratovolcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **382**, 267–297.
- Whitehead, M. G. and Bebbington, M. S. (2021) Method selection in short-term eruption forecasting. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **419**, 107386.

地下構造情報を中長期の噴火可能性評価にどう使うか

橋本武志¹

¹ 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 8 丁目 1. Email: hasimoto@sci.hokudai.ac.jp

1. はじめに

このシンポジウムでの「中長期」が数 10 年から 100 年程度を指すことをふまえると、「中長期のマグマ噴火の予測」という目標には、おそらく二つのことが含まれる。「中長期的な先行現象の監視に基づいた噴火予測」と「マグマの活動性の評価」である。これらはそれぞれ、「先行現象の発生源・発生場としてのマグマ供給系(火道やマグマ溜まり)の理解」と「マグマの状態把握」という二つの課題に結びついている。物理探査に基づく地下構造の情報は、これらの双方に関係してはいるものの、構造の知見が直ちに噴火予測に結びつくわけではない。しかし、構造が分かっているならば、現在の火山活動の評価・解釈やその後に起こりうる現象の想定、さらには噴火ポテンシャルの評価に役立てることが可能ではないだろうか。本稿では、特に電磁探査に基づく地下比抵抗構造に軸足を置いて、中長期予測・評価への道筋について考えてみたい。

地下の電氣的物性を推定する物理探査法のひとつに、マグネトテルリク法(以下 MT 法)がある。この手法は、電離層電流などを起源とする磁場の揺らぎが地中に浸透する際の電磁誘導現象を利用する。1980 年代頃から、特定の測線に沿った 2 次元断面解析が一般化したものの、2 次元解析では、しばしば非現実的な仮定(すなわち、測線に直交する方向に沿って無限に同じ構造が続く)の下でモデリングをせざるを得ないという問題があり、火山地域での有効性にはやや疑問があった。しかし、近年は計算機の性能と解析技術が向上し、最近 10 年ほどの間に 3 次元インバージョン解析が普及したことで、火山のように不均質が極めて強い対象についても、地下構造を可視化する手法として MT 法が広く用いられるようになってきている(第 1 図)。日本では、霧島山(Aizawa *et al.*, 2014)、浅間山(Usui *et al.*, 2017)、箱根山(Yoshimura *et al.*, 2018)、阿蘇山(Hata *et al.*, 2018; Matsushima *et al.*, 2020 等)、雌阿寒岳(Inoue *et al.*, 2022)、草津白根山(Matsunaga *et al.*, 2022)、九重山(Aizawa *et al.*, 2022)などで 3 次元 MT 探査・解析がすでに行われている。現状では、マグマ供給系またはそれに関連すると思われる構造をイメージングできている例ばかりではなく、論文中に提示されているのは深さ 15km 程度より浅い部分に限られることが多い。これは、最近の研究では、近年の人的被害を伴う水蒸気噴火との関連で、比較的浅部に見られる低比抵抗の「粘土キャップ」に焦点が当たることが多かったことにも一因がありそうである。また、このような低比抵抗の粘土層は電磁波の浸透を阻害するため、それを突き抜けて深部のマグマ供給系をイメージングするには、測定期間を長くにとって長周期帯まで良質の電磁場データを得る必要があることも関係していると思われる。現状ではマグマ供給系がイメージングできた(とされている)火山は世界的にもそう多くはないが、今後、面的な広帯域 MT 観測が充実

すれば、報告事例が増えると思われ。次章では、「マグマ供給系の理解」と「マグマの状態把握」の観点に分けて、比抵抗構造の情報を中長期予測・評価にどのように利用できるかについて考え、現状の問題点や限界、解決すべき課題についても述べる。

2. 地下構造とマグマの活動性・噴火可能性評価(現状と課題)

2.1 マグマ供給系の理解

物理探査による構造推定の強みは、火道やマグマ溜まりなどの「異常体」の位置や大きさのある程度特定できることであり、これは岩石学的手法では得ることが難しい情報であろう。楽観的に考えれば、マグマ溜まりや、そこから地表への通路、その間の障害物の有無などが明らかになれば、マグマが動き出した後の予測や事前の対策も立てやすくなると期待される。例えば、マグマ溜まりの位置と大きさを知っていれば、上昇を始めたマグマの挙動を予測するモデルないしは仮説を組み立てるための強力な足がかりになりそうに思える。この場合の念頭にあるのは、時間発展を取り扱えるタイプの火道流モデルなどである。近年は、マグマの物質・物性情報を噴出物から測定する手法も進歩しているようなので、モデルに流し込むマグマの条件についてもそれなりに現実的な値を与えることができる。すれば、シミュレーションを予測ツールとして使うことが可能になるのかもしれない。構造の情報は、こうしたモデルに必要となる火道の長さや太さ、マグマ溜まりの大きさなどの基本的枠組みを与えることになる。ただし、動き出す前のマグマの活動性や噴火可能性の評価は、マグマ供給系の静的な構造情報(容れ物の情報)のみでは難しい。一般に、火道流モデルは中長期的な時間スケールで噴火の発生を予測するモデルではないので、現在噴火していない火山が次にいつ噴火するかを予測するには、次項に述べるマグマ溜まりそのものの時間発展を記述する何らかのモデルが必要だと思われる。

現状での問題は、「構造推定の不確かさ」や「解釈の任意性」に起因している。前者は探査手法の原理やモデリングの条件に関わっている。MT法では様々な波長の電磁波を解析するが、探査深度は媒質の比抵抗と電磁波の波長に依存する。長波長成分の応答特性に依拠する深部の解像度は低いので、深部における細かな構造(例えば、Cashman *et al.*, 2017 などの提案する地下深部の入り組んだダイクやシルの集合体のような構造)は、存在してもその通りにイメージングすることは原理的に不可能である。モデルのメッシュを細かく切ったとしても、それに応じた細かな構造が得られるわけでもない。もともと、深部の細かな構造は、地表で観測される電場磁場の応答特性に有意な差異をもたらさないうえ、インバージョン解析では、評価関数にスムージング条件が課されることが多いためである。このため、局在した強い異常体と、ある程度の広がりをもつ弱い異常体を見分けることは一般に困難である。例えば、高比抵抗の母岩中に置かれたダイクやシルのような良導体は、ぼやけた形状としてイメージングされる可能性が高い。この意味で、比抵抗モデルのどこを物質境界と判定するかについては注意が必要である。一方で、熱や揮発性物質の拡散があるならば、異常体の周辺部に低比抵抗域が浸み出した構造こそがリアルである可能性もあるが、両者は見かけ上は区別できない。さらに、同じ観測データとインバージョンコードを使っても、初期条件や制約条件を変えることで、得られるモデルも変わることは珍しくない。解釈の任意性にまつわる問題は他にもある。MT法で推定できるのは、解像度ス

ケールの平均的な物性値である。リアルな岩石は固相(鉱物)と液相(水やメルト)と気相(空気や火山ガス)の混合物だが、そのような微視的スケールの不均質はMT法では見えず、混合物を擬似的な単相と見なしたバルクの比抵抗として表現される。一般に固相や気相の比抵抗は高いので、バルクの電気伝導の大半を担うのは液相(間隙流体)であるが、あるバルク比抵抗値を説明可能な、空隙率(及び空隙の連結度)と間隙流体の比抵抗の組み合わせはいくつもあり得る。例えば、火山の地下で低比抵抗異常があると、その実体がマグマなのか熱水なのかというのは、しばしば問題になる点である。

2.2 マグマの状態把握

次に、推定されたマグマ溜まりの比抵抗値から現在のマグマの状態が把握できるのかという問題について考える。ケイ酸塩メルトの比抵抗については、室内実験の知見が集積してきていることから、SIGMELTS(Pommier and Le-Trong, 2011)などのモデルを使って、化学組成、温度、圧力、含水率等を指定すれば計算できるようになっている。構造モデルからマグマ溜まりの位置や大きさが特定できたとして、何らかの方法でそのマグマ溜まりの比抵抗が誤差範囲付きで推定できれば、適当な混合則(例えば、Archie 則)に基づいてその比抵抗値に合うメルト分率を推定する。メルト分率は、そのマグマが噴火可能(eruptible)な状態かどうかを判断する上で重要な指標なので、このような手順の延長線上で中長期的な噴火可能性を確率的に評価することができるかもしれない。実際に特定の火山についてこうした方法で噴火可能性を確率的に評価した研究例を筆者は知らないが、その基礎となり得る検討は既にいくつかの火山で試みられている(例えば、Hata *et al.*, 2018, Ichiki *et al.*, 2021)。

長期的には、マグマの移動や母岩との相互作用も含め、マグマ溜まり自体も時間変化していくはずだが、それを監視観測で捉えて経験則的予測に持ち込むというアプローチは、ごく一部の火山を除いてあまり現実的とは思えない。それゆえ、この部分については岩石学の知見をベースとしたマグマ溜まりの時間発展モデルを用いた予測や評価が必要になると思われる。その際、実体が必ずしも解明されていない部分が多いので数値計算に取り入れることは難しいかもしれないが、マグマ溜まりへの注入や、マグマ溜まりからの上昇のプロキシとして、深部低周波地震の頻度は参考とすべき指標になるかもしれない。マグマ溜まりの増減圧を地殻変動で捉えられる場合はそれも考慮に入れるべきであろう。

しかし、やはりここでも問題となるのは、観測から推定される比抵抗値そのものの不確かさである。高精度な観測ができたとしても、前項で述べたように、構造モデルには様々な要因に起因する推定誤差が伴う。従って、確率評価という観点に照らせば、フォワード計算による感度チェックや、様々なインバージョン条件で得られた結果を丁寧に比較検討するなど、さまざまな角度からマグマ比抵抗の推定誤差を評価することが欠かせない。もちろん、誤差範囲があまりに大きいと、そのマグマの活動性評価そのものが意味をなさなくなってしまう。その場合には、推定誤差を小さくするために、後述するように他の物性値と比較したり、観測データの取得方法やモデリング手法から改良する努力をしたりすることも必要になると思われる。

3. まとめ

3.1 当面取り組むべき課題

マグマ供給系のイメージングは現在でも依然として難易度が高い課題であるため、当面は研究ベースで取り組むことになると思われるが、3次元解析には良質な面的データが必須であり、研究者が自力で探査データの取得から実施するやり方では限界がある。外注で構造探査データを得られるようになるか、すでに探査データがある程度得られている火山を対象とすることで、解釈や評価、予測のスキーム作りに注力し、その部分の研究を進展させるべきだと考える。また、構造推定の不確かさや解釈の任意性の問題を緩和するには、各種モニタリング観測から得られる unrest 事象のソース、例えば震源分布や地殻変動源などとの対比を通じて、インタラクティブに構造モデルと現象の解釈をリバイスしていくことが、地道だが着実な方法ではないかと考える。さらに、3次元の比抵抗構造探査の事例が増えてきた現在、他の物性値、例えば地震波速度や密度構造との比較は、実体の理解を深める上で積極的に取り組むべき時期に来ているように思われる。すでに、一部の研究で試みられているように、ジョイントインバージョン解析において、複数の物性値のいずれも合理的に説明できるモデルパラメータを探索するだけでなく、それらの物性値間の関係を与える規則も拘束条件に含めて同時に推定するという手法も提案されている(Carrillo and Gallardo, 2018)。一方では、それぞれの手法のモデリングにも任意性や恣意性が含まれている以上、安易にジョイント解析を試みても意味がないという意見もある。まずは、双方の観測データをいずれも矛盾なく説明できる必要条件を調べるだけでも、許容可能なモデルの範囲を狭めることに役立つのではないだろうか。

3.2 対象火山の選定についての考え方

上述した、各種モニタリング観測(準定期的な物質分析を含む)と地下構造探査の連携による長期評価・予測の推進を意識すると、平時の火山活動に適度な消長が見られる火山を対象とするのが有利である。このような火山では、すでに多項目観測の体制が整っていることも期待できる。一方、マグマ溜まりの状態把握という観点から考えると、地質学・岩石学的な知見が豊富で、近年の噴出物の分析からマグマの状態がある程度制約できているか、何らかの仮説が出されている火山が望ましい。マグマ供給系のサイズが大きいことも好ましい条件である。これらの観点を総合的に考慮すると、支笏一樽前、阿寒一屈斜路、伊豆大島、阿蘇山、霧島火山群などが候補として考えられるのではないだろうか。

4. おわりに

約30年前の第5次噴火予知計画(1994-1998)では、「火山体の構造把握」が中心的目標のひとつに据えられていた。物理・化学モデルに基づく噴火予知、特に噴火様式や噴火終息の予測にマグマ溜まりの情報が必要だというのがその根拠であった。残念ながら、今から振り返ると、これは理念としてはよかったが、先取りし過ぎで実力が追いついていなかったように思われる。現在も当時の目標はまだクリアできているとは言えないが、部分的にはようやく手が届きつつあるように見える。このタイミングで、活動予測の戦略について専門分野を超えて議論する場が設けられることは大変意義深い。本稿では、地下構造という観点からの戦略を提案した。評価や予測には誤差がつきものであり、手法も確立し

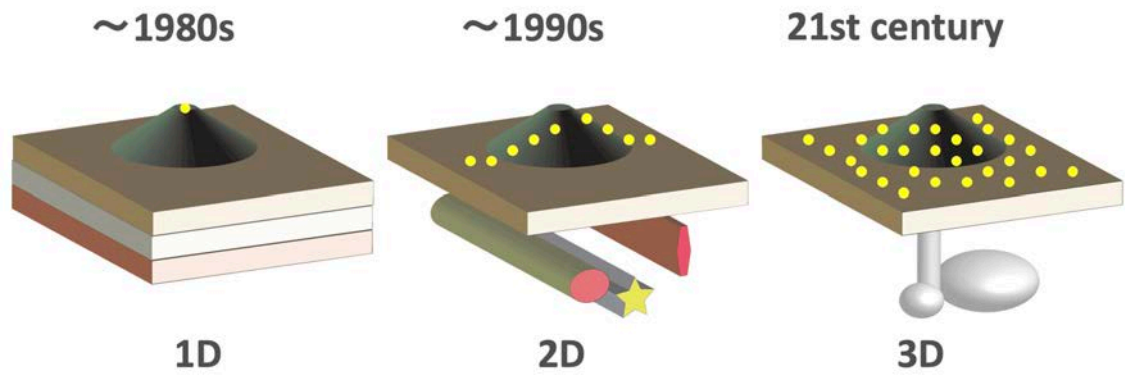
ていないので、複数の手法で予測し、その違いを示すことも現状では有益なのではないかと考える。

引用文献

- Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Kanda, W., Utsugi, M., Yoshimura, R., Yamaya, Y., Hashimoto, T., Yamazaki, K., Komatsu, S., Watanabe, A., Miyakawa, K. and Ogawa, Y. (2014) Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima Volcanoes as inferred from broadband magnetotelluric data. *J. Geophys. Res., Solid Earth*, **119**, 198–215. <https://doi.org/10.1002/2013JB010682>
- Aizawa, K., Utsugi, M., Kitamura, K., Koyama, T., Uyeshima, M., Matsushima, N., Takakura, S., Inagaki, H., Saito, H., and Fujimitsu, Y. (2022) Magmatic fluid pathways in the upper crust: insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan. *Geophys. J. Int.*, **228**, 755–772. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab368>
- Carrillo, J. and Gallardo, L.A. (2018) Joint two-dimensional inversion of magnetotelluric and gravity data using correspondence maps. *Geophys. J. Int.*, **214**, 1061–1071. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy195>
- Cashman, K.V., Sparks, R.S.J., and Blundy, J.D. (2013) Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. *Science*, **355**, 6331. <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- Hata, M., Matsushima, N., Takakura, S., Utsugi, M., Hashimoto, T., and Uyeshima, M. (2018) Three-dimensional electrical resistivity modeling to elucidate the crustal magma supply system beneath Aso caldera, Japan. *J. Geophys. Res., Solid Earth*, **123**. <https://doi.org/10.1029/2018JB015951>
- Ichiki, M., Kaida, T., Nakayama, T., Miura, S., Yamamoto, M., Morita, Y., and Uyeshima, M. (2021) Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method. *Earth Planets Space*, **73**:150. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01451-y>
- Inoue, T., Hashimoto, T., Tanaka, R., and Yamaya, Y. (2022) A broadband magnetotelluric survey for Mt. Meakandake volcano with special attention to the unrest during 2016–2017. *Earth Planets Space*, **74**:114. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01673-8>
- Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Nishizawa, T. (2022) Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **429**, 107600. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107600>
- Matsushima, N., Utsugi, M., Takakura, S., Yamasaki, T., Hata, M., Hashimoto, T., and Uyeshima, M. (2020) Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical

resistivity structures. *Earth Planets Space*, **72**:57. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01180-8>

- Pommier, A. and Le-Trong, E. (2011) “SIGMELTS”: A web portal for electrical conductivity calculations in geosciences. *Computers and Geosciences*, **37**, 1450–1459. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.01.002>
- Usui, Y., Ogawa, Y., Aizawa, K., Kanda, W., Hashimoto, T., Koyama, T., Yamaya, Y. and Kagiya, T. (2017) Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements. *Geophys. J. Int.*, **208**, 1359–1372. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw459>
- Yoshimura, R., Ogawa, Y., Yukutake, Y., Kanda, W., Komori, S., Hase, H., Goto, T., Honda, R., Harada, M., Yamazaki, T., Kamo, M., Kawasaki, S., Higa, T., Suzuki, T., Yasuda, Y., Tani, M. and Usui, Y. (2014) Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion. *Earth Planets Space*, **70**:66. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0848-y>



第1図 火山体地下構造探査の発展に伴う探査対象の変遷(イメージ).

シンポジウム「火山噴火の中長期的予測に向けた研究の現状と今後の課題」

〔要旨集〕

発行:令和4年12月11日

主催:地震・火山噴火予知研究協議会 火山計画推進部会

※ 本要旨集に用いられている図表の使用許可については、本シンポ事務局から出版元に確認済みである