

# 桜島ブルカノ式噴火の確率的噴火予測にむけて

石 井 杏 佳

## 1 はじめに

火山学において噴火予測は最大の目標の一つである。その基本的な思想は噴火の前兆現象を観測で捉えることにある。というのも、噴火という形で現象が地上に顕在化する前に、地下でマグマの移動やそれにとまなう場の変化が生じるからである。たとえば、アイスランドのレイキャネス半島では2021年におよそ800年ぶりの噴火が発生した。噴火の数週間前から群発地震が発生し、いまかいまかと噴火が待たれた中、3月に溶岩流出が始まった。その後2024年2月半ばまでに、火口の位置を変えながら計6回の噴火を繰り返している。2023年10月末ごろからは住宅地に近い場所で地震が多発し地面が大きく変形したため、周辺観光施設の閉鎖や住民の避難が行われた。緊迫感の高まった状態の中、12月18～21日に噴火が発生した。翌1月14日に再開した噴火では、溶岩流が町に到達し火災が発生した。その後噴火活動は一旦停止したが、再度2月8日にも噴火が発生しており、今後の動向が注視される状況である<sup>(1)</sup>。この事例が示すのは、火山噴火の前には何らかの前兆現象が捉えられること、と同時に具体的な対応をとるためには前兆現象を捉えるだけでは必ずしも十分ではないこと、である。いつ噴火が起こりいつまで続くのか、どのような噴火が起こりどんなハザードが起こりうるのか、などが示されて初めて社会的に有益な情報になる。

しかし、現在の火山学において、噴火の具体的な描像を事前に一意に提示することは難しい。そこにはさまざまな可能性が存在し、一体どのシナリオになるのかはこれまでの経験値に頼らざるをえないからであ

(1) アイスランド気象庁 HP <https://en.vedur.is/about-imo/news/a-seismic-swarm-started-north-of-grindavik-last-night> (2024.2.14閲覧)

る。その際に、重要になるのが「確率」である。確率を用いることで、予測がどのくらい確からしいかを定量的に示すことができる。本稿では、桜島で観測されている地盤変動データを用いて噴火の規模や時刻を「確率的に」予測する試みについて紹介する。以下では、まず噴火予測そのものについて概観した後、桜島の噴火活動とそれともなう地盤変動について紹介する。その後、桜島での確率的噴火予測へむけた試みについて報告する。なお、前もって未来の噴火現象を予想するという意味で、「噴火予測」と「噴火予知」の2種類の表現が使われることが多いが、本稿ではこれらを区別せず、以降「噴火予測」に統一して使用する。

## 2 確率論的予測と噴火予測

噴火を予測するには、噴火の時期・規模・場所・様式・推移の5要素を予測することが必要である。観測技術の向上によって多様な前兆現象が捉えられるようになってきているが、この5要素を完全に予測するという点においては、噴火予測の研究は未だ道半ばである。これは前述の通り、前兆現象を捉えることで噴火が近々発生するとは言えても、それが明日なのか、明後日なのか、大きいのか、小さいのか、など具体的な描像まではなかなかわからないからである。特に一旦噴火が始まってからの活動推移の予測は未知な点が多く、過去の噴火事例などを踏まえて複数のシナリオを想定しておくより他にない。また、観測技術や現象理解の不足に加え、火山というシステムが持つ本質的な複雑性ゆえに、そもそも決定論的に予測を行うことに限界がある。したがって、確率論的予測が重要になる。自然現象そのものの不確かさと人間側の認識の不確かさをまとめて確率という形で表現することで、起こり得る現象をなんとか定量的に評価しようとしているのである。

確率論的予測は多くの地球科学分野で取り組まれている。たとえば、火山噴火より予測が困難な地震予測においては、確率論的予測に大きく舵を切っている。1995年の阪神・淡路大震災を契機に、地震調査研究推進本部によって確率論的地震動予測地図がまとめられた。これは、各地の地震発生確率の評価に加えその地点の揺れやすさも鑑みて、揺れが一定の大きさを超える確率を評価したものである。「今後X年以内に震度Y以上の揺れに見舞われる確率はZ%」という文言は、ニュース等でも

見かけるだろう。また、高精度なモデル化が進んでいる気象予測でも、モデル計算に使用する初期値やモデルの仮定から誤差が生じることを考慮して、複数の条件を用いて予測を行う（アンサンブル予測と呼ばれる）。最終的に予測された複数のシナリオの分布から、起こる可能性の高いシナリオを確率的に評価する。台風の進路予測においては、予報円の大きさでこのような確率的評価を直感的に表現している。

噴火予測において、確率論的予測の風土が比較的によく根付いているのは、長期予測である（Marzocchi & Bebbington, 2012）。長期予測とは、数年～数十年規模で活動を予測するものであり、主に土地利用の評価や避難計画の策定等に利用される。長期予測のためには、噴火史を明らかにする必要がある。本格的な火山観測が始まったのはたかだか100年程度であるため、火山周辺に堆積した過去の噴火の噴出物や古文書の記録が調査され、噴火の発生間隔や規模（噴出量）の情報に焼き直される。特に噴火の発生間隔を用いた予測研究は古くから盛んに行われている。発生間隔の周期性の有無を確率モデルで表現し、今後数十年の噴火確率などが評価される。ただ、時代が古くなるほど十分な記録が残っておらず、適切に規模や間隔の評価をすることが難しくなる。このような背景から、長期予測においては決定論的な予測はそもそもできないという前提が受け入れられてきたと考えられる。

一方、数時間～数ヶ月程度の活動予測は短期予測と呼ばれる。長期予測とは異なり、火山観測結果に基づいて行われることが多い。マグマの移動にともなう地震の増加や山体の膨張、噴出する火山ガスの増加など、噴火の前兆となる観測結果を得ることによって噴火の発生を予測する。これまで多くの噴火が発生している桜島のような火山では前兆現象の特徴をある程度掴めているため、実用的な予測が可能になる。しかし、いくら明確な前兆を観測できて、豊富な経験値が貯まっても、噴火の時期や規模を完璧に断定することは難しい。また、前兆現象の「くせ」は個々の火山に依存する傾向にあるので、過去の噴火の観測回数が少ない火山では予測精度が下がる。さらに、明らかに活動が高まり噴火が発生すると思われたのに結局噴火しなかった場合（噴火未遂）や、観測精度や観測点配置などの影響で前兆現象を捉えられないまま噴火が発生してしまう場合もある。このような観点から、短期予測においても確率的

噴火予測の重要度は極めて高い。

### 3 桜島のブルカノ式噴火

日本屈指の活動度を誇る桜島は、噴火予測研究、特に短期予測研究の検証に適した火山である。以下では、桜島での噴火予測を議論する前提となる、噴火活動の特徴と活動にともなう地盤変動について述べる。

#### 3-1 桜島の噴火活動

2.9万年前の超巨大噴火によって現在の鹿児島湾北部に始良カルデラが形成された。その3000年後、カルデラ南縁に誕生した火山が桜島である。有史以降には、天平宝字（764年）、文明（1471～1476年）、安永（1779年）、大正（1914年）の4回の大規模噴火が発生しているが、1955年以降はブルカノ式噴火と呼ばれる噴火様式が活動の主体を占める（図1）。このブルカノ式噴火の噴火頻度の高さと顕著な前兆地盤変動の存在が、桜島で短期的噴火予測を可能にしている所以である。



図1：桜島のブルカノ式噴火（2023年6月7日）

ブルカノ式噴火とは、イタリアのブルカノ島の噴火がその名前の由来である。岩塊を噴き飛ばし爆発的な噴火を繰り返す噴火様式を指す。ブルカノ式噴火の発生前には火道上部に冷えて固まった溶岩の「栓」（火山学分野では“プラグ”と呼ばれる）が形成される。この栓の存在によって火道内部の圧力が徐々に高まり、その過剰圧によって栓が破壊され噴

火が始まると考えられている（図2）。1回の噴火は数分～数時間程度の短時間で終了するが、その後再び栓が形成され何度も噴火を繰り返す。桜島には南岳山頂火口と昭和火口の2つの活動火口があり、そのいずれでもブルカノ式噴火が発生する。1955年から2005年までは南岳での活動が主体であったが、2006年からは昭和火口に活動火口が移った。昭和火口での噴火はそれまでの南岳での噴火に比べて小規模であったものの噴火回数は倍増し、気象庁の報告によると2010～2013、2015年には年間1000回をこえる噴火が発生した<sup>(2)</sup>。2017年以降はまた南岳で主に噴火が発生している。

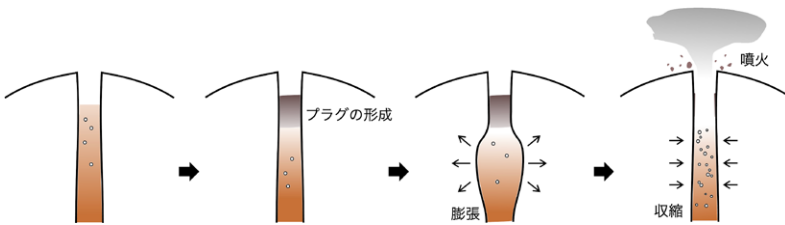


図2：ブルカノ式噴火の概念図

### 3-2 桜島の地盤変動観測とマグマ供給系

噴火の発生前にはマグマが地表付近へ移動し、地盤変動が生じる。このような変動をさまざまな手法で常時観測することが噴火予測につながる。桜島では、個々のブルカノ式噴火に対応した地盤変動が観測される。この局所的かつ短期的な地盤変動を捉えるのに適しているのが、傾斜計や伸縮計である。これらはそれぞれ、文字通り地面の傾きを測る計器と地面の伸び縮みを測る計器である。1955年からの噴火活動活発化にともない、1956年から伸縮計や傾斜計による地盤変動観測が島内で始まった（吉川、1957；下鶴・ほか、1957）。当時は、現在の桜島フェリーターミナルのそば（袴腰）にあった壕内で観測が行われた。その後、より高精度の観測のために地下観測坑道が整備された。1985年に始まったハルタ山観測坑道での観測を皮切りに、現在では島内の3ヶ所の坑道で観測が行われている（2006年～有村観測坑道；2016年～高免観測坑道；図3）。

(2) 鹿児島地方気象台 HP [https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr\\_erp\\_num.html](https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html) (2024.2.5閲覧)

観測坑道は季節による温度変化が小さくノイズも少ないため、マグマの移動によるナノスケールの地盤変動の検知に極めて適した環境である。

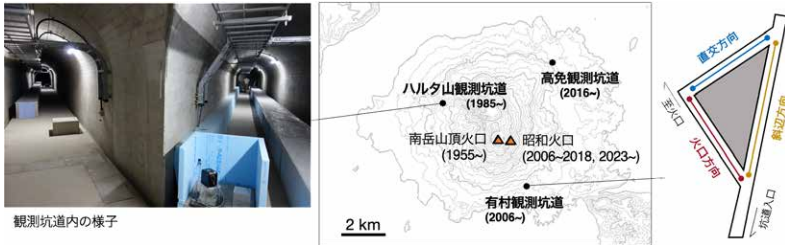


図3：桜島の活動火口と地下観測坑道

図4に桜島に設置された傾斜計・伸縮計の概念図を示す。傾斜計は2つの水槽が28 mの長い管で繋がれた構造をしており、それぞれの水槽に浮きが浮いている。2つの浮きの位置を測り、その差を求めることによって地盤の傾きを求める。伸縮計は、片方が固定された石英尺の長さを測って地盤の伸び・縮みを得る。坑道は基本的に海側から山側に向かって掘られており、一番奥が直角三角形になっている(図3)。直角三角形の三辺のうち火口方向とそれに直交する方向に傾斜計が、また三辺全てに伸縮計が設置されている。世界的に見ても活動的な火山にこの規模の観測坑道が3つもある例は非常に珍しい。これらの計器は火山由来の変動だけでなく、潮汐による変動も記録する。島内の避難港では潮位観測が実施されており、その観測値を利用して潮汐による影響を観測記録から除去している。

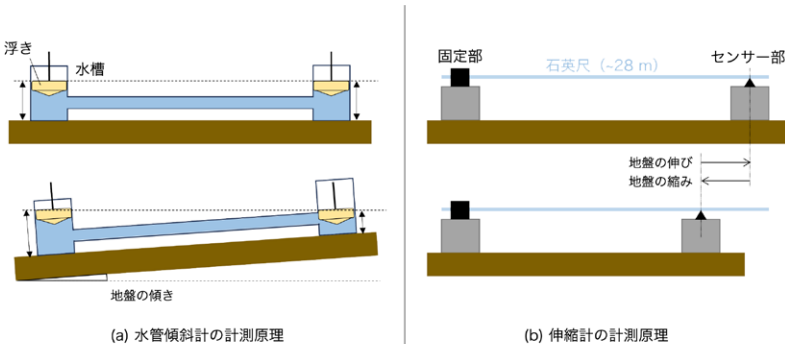


図4：傾斜計、伸縮計の計測原理



桜島ブルカノ式噴火の確率的噴火予測にむけて

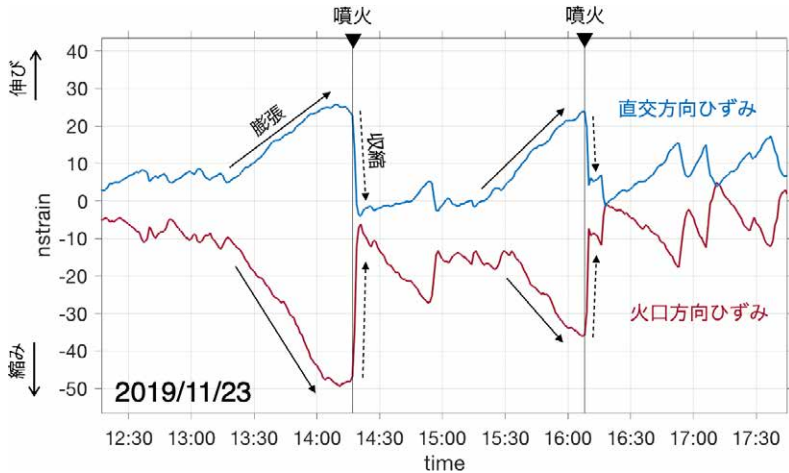


図5：噴火にともなう地盤変動（伸縮計記録）

実際に観測された地盤変動記録（潮汐補正済み）を図5に示す。3つの観測坑道のうち、火口の南東側に位置する有村観測坑道（国土交通省大隈河川国道事務所管理）の伸縮計記録である。この観測点は表層に近い深さでの圧力変動に敏感に反応するため、個々のブルカノ式噴火にともなう地盤変動が最も明瞭に表れる。典型的な噴火の場合、噴火発生のおよそ20分～1時間ほど前から変動が観測される。これは、マグマが地表近くに上昇してくることによる山体の膨張と解釈される。一方、噴火が発生すると変動が急激に反転する。これは、蓄積していたマグマやガスが大気中に放出されることによる山体の収縮を捉えたものである。この収縮の大きさが噴出する火山灰の量、つまり噴火の規模と強く関係する。噴火が終わると次の噴火への準備期間となり、再度膨張し始める。これらの変動の圧力源は、火口直下数 km 程度の深さにあると推定されている（Ishihara, 1990; Iguchi et al., 2013；図6）。有村観測坑道ではおよそ9割の噴火で前駆的な地盤変動が捉えられるため、リアルタイムでデータを眺めていれば「もうすぐ噴火が発生しそう」であることがわかるのである。

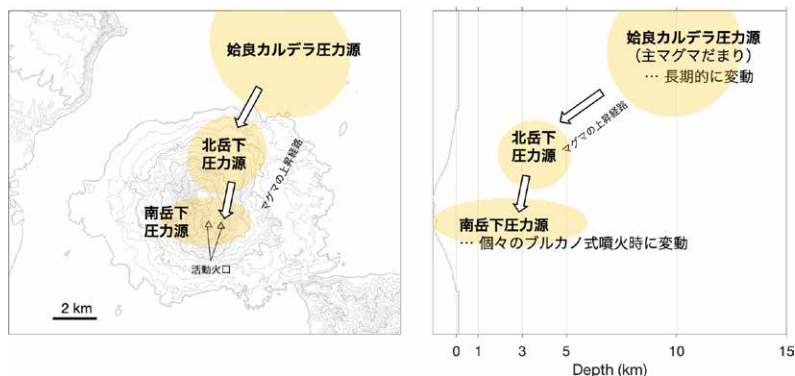


図6：先行研究で推定されている桜島周辺の圧力変動源のおおよその位置。圧力源の位置は、始良カルデラ下、北岳下、南岳下の3つの領域に分けられる。

一方、桜島では長期的かつ広域的な地盤変動も捉えられている。これまで長期にわたって反復されている水準測量によって、1914年の大正噴火とその後の噴火活動による変動が高精度で測定されてきた。水準測量とは、2地点で地面に対して鉛直に物差し（標尺）を立て、その間に水準儀と呼ばれる機械を置いて水平をとり、2本の標尺の目盛りの差から標高差を測る古典的な手法である。この観測によって、大正噴火によって1 m 近く沈降した地面がその後100年以上かけてゆっくりと元に戻ってきていることが明らかになった。この変動の圧力源は始良カルデラの地下およそ10 km の深さに推定されている（図6）。ここが桜島の主要なマグマだまりであり、現在も山頂火口へ向かってマグマを供給していると考えられている。1990年代以降は、GNSS（GPS）観測によってさらに詳細なマグマ供給系の構造が明らかにされている。GNSS 観測は、衛星からの電波を地上のアンテナで受信して観測点の正確な位置座標を測定する手法である。高い時間分解能と観測点維持管理のしやすさから急速に普及し、桜島島内にも多くの観測点が存在している。このGNSS 観測網は北岳下圧力源の発見につながり（Iguchi et al., 2013；図6）、また2015年に発生したダイク貫入イベントの変動源推定にも活用された（Hotta et al., 2016）。これらの観測は個々のブルカノ式噴火の予測には不向きだが、長期的な活動予測や大正噴火クラスの大規模噴火への準備過程を評価するのに有効である。



## 4 桜島における確率的噴火予測に向けた試み

### 4-1 桜島の噴火予測

桜島では1980年代からブルカノ式噴火の発生予測へむけた取り組みが行われてきた。その背景には、1970～80年代の非常に活発な南岳山頂火口での噴火活動がある。噴石、空振、降灰等による住民生活への被害が甚大であったために、噴火予測への社会的な要請が現在よりもずっと高かった。現在、噴火活動は当時に比べて穏やかにはなったものの、民家近くへの噴石の飛散（2020年6月4日）や鹿児島空港への降灰（2019年7月29日）などを引き起こす社会的影響の大きな噴火も時折発生する。また、火山の近傍で働く砂防工事従事者にとっても、噴火するか否かの予測は重要な情報である。幸い、桜島の通常の活動を予測する場合には、噴火の5要素全てを予測する必要はない。噴火の場所は2つの活動火口のいずれかであり、様式はブルカノ式噴火で、長く継続することはないからである。したがって、重要なのは噴火の時期と規模になる。

桜島で初めて個々の噴火イベントの予測を試みたのは、Kamo & Ishihara (1989) である。彼らは、ハルタ山観測坑道の傾斜計記録（火口方向成分）を用いたリアルタイムの噴火予測システムを実装している。リアルタイムで観測所に送られてくる傾斜記録から、総変動量と時間当たりの変動率が計算され、その値に応じて5つのステータスのいずれかに自動判定される。傾斜の変動率が負の場合、山体が収縮していることを意味するので「噴火発生中」と判定され、変動率が0付近の場合は「非噴火」と判定する。変動率が正の場合は山体が膨張しているので「噴火発生前」と判定され、その中でも総変動量の増加とともに「注意」「危険」とステータスが変わり、噴火リスクが高まっていることが示される。1985年に記録されたデータにこの手法を採用すると、噴火発生前に「危険」の判定が出た59例中、実際に噴火が発生したのは38例であった。近年では機械学習を用いた応用も行われている（村田・ほか、2018）。

しかし、上記の予測は定性的である。5つのステータスが示すのは、あくまで現在の状況が噴火リスクの高い／低い状態であるということだけであり、「いつ」「どのくらい」の噴火が起こるかについての具体的な情報は提示していない。また、ステータスの確からしさ（「危険」という判定がどの程度信頼に値するのか）も示されない。シンプルな表現ゆえ

のわかりやすさはあるものの、被害の評価や具体的な対策を行うためにはもう少し解像度の高い情報が必要だろう。

## 4-2 確率的噴火予測への取り組み

そこで、現在京都大学では桜島で確率的な噴火予測を行うシステムの実装に取り組んでいる。これは、「いつ」「どのくらい」の噴火が「どの程度の確からしさ（確率）」で起こり得るかを予測するものである。リアルタイムで得られる地盤変動データを踏まえて想定されるいくつかのシナリオを用意し、それぞれの発生確率を提示する。確率の算出には、膨大な過去の噴火の地盤変動データから推定された確率モデルを用いる。さらに、刻々と変化するデータに応じて、想定されるシナリオとそれぞれの確率を更新していき、より現実的な予測を行う。

このように確率を算出することのメリットは、噴火にともなうハザードの評価もより定量的にできるようになることである。現在の桜島の活動において、最も影響力の大きなハザードは降灰である。気象庁が発表している降灰予報（定時）<sup>(3)</sup>は、仮に一定の規模の噴火が発生した場合にどこに降灰があるかを予測している。つまり、噴火の発生の有無そのものを予測するのではなく、仮に噴火が発生した場合の被害予測である。したがって、噴火そのものがいつ起こり、どのくらいの規模であるのかを評価できるようになれば、噴火の規模やその時の気象場（風向・風速）に応じてより現実的な降灰予測が可能になる。

したがって、桜島で発生した過去の噴火にともなう地盤変動データの特徴を整理した。図7に、2017～2020年に南岳山頂火口で発生した爆発の地盤変動の特徴をまとめた（Ishii & Iguchi, submitted）。ここで、爆発とは一定の大きさの振幅を超える空振が観測された事象を指している。有村観測坑道で観測された伸縮計記録から、(a) 噴火に前駆する山体の膨張の継続時間、(b) 膨張体積、(c) 噴火の発生による山体の収縮体積、(d) 膨張体積に対する収縮体積の割合（ $= c/b$ ）の4つの項目を抽出し、その頻度分布を示した。いずれの分布にも共通するのは、ピークをもった分布であることである。これは、噴火が必ずしもランダムに発生して

(3) 気象庁では他に、降灰予報（速報）と降灰予報（詳細）を発表しているが、これらはいずれも噴火の発生が確認された後に発表される降灰予測である。

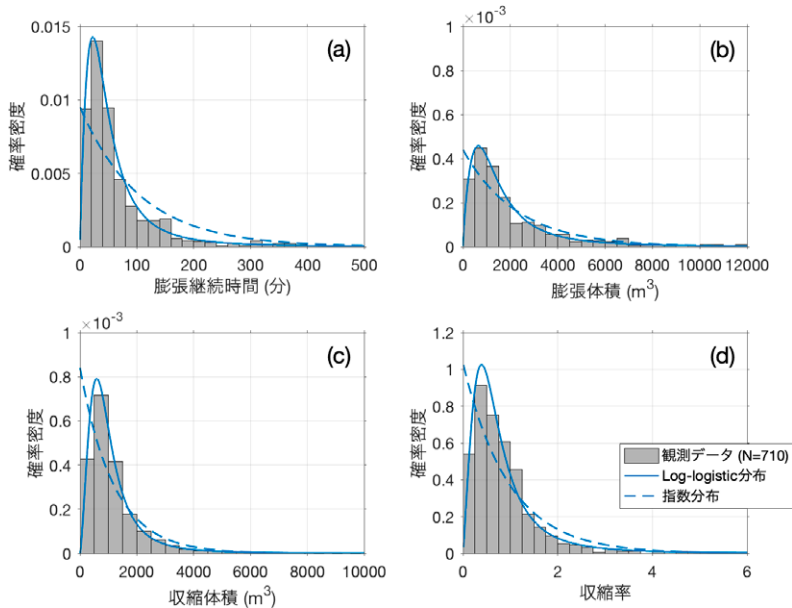


図7 地盤変動データから得られた特徴量の確率分布。(a) 膨張継続時間、(b) 膨張体積、(c) 収縮体積、(d) 収縮率 (収縮体積 / 膨張体積)。

いる訳ではなく、何らかの規則性が存在することを意味している。仮にランダムに噴火が発生すると、その頻度分布は図中点線で示した指数関数に従う。一般的に、機械の故障や交通事故などの発生間隔はこの分布でうまく説明できるといわれている。一方、図の4つの項目は指数関数には合っておらず、実線で示された分布 (Log-logistic 分布) によく合うことがわかった (Ishii & Iguchi, submitted)。

過去のデータをよく説明できるモデル分布が明らかになったことで、リアルタイムの地盤変動データを使った確率的な噴火予測が簡単にできるようになる。たとえば、噴火時刻は図8のような考え方に則って評価する。用いるのは、図中実線で描かれた噴火前の膨張継続時間の分布である。これを見ると、膨張開始から20分程度で噴火するイベントが最も多いことがわかる。そのため、山体の膨張が検出され始めてすぐのときには、20分程度で噴火する確率が最も高いという予測になる (図8 a)。しかし、噴火せずに20分を超えても膨張が継続している場合、今度は今

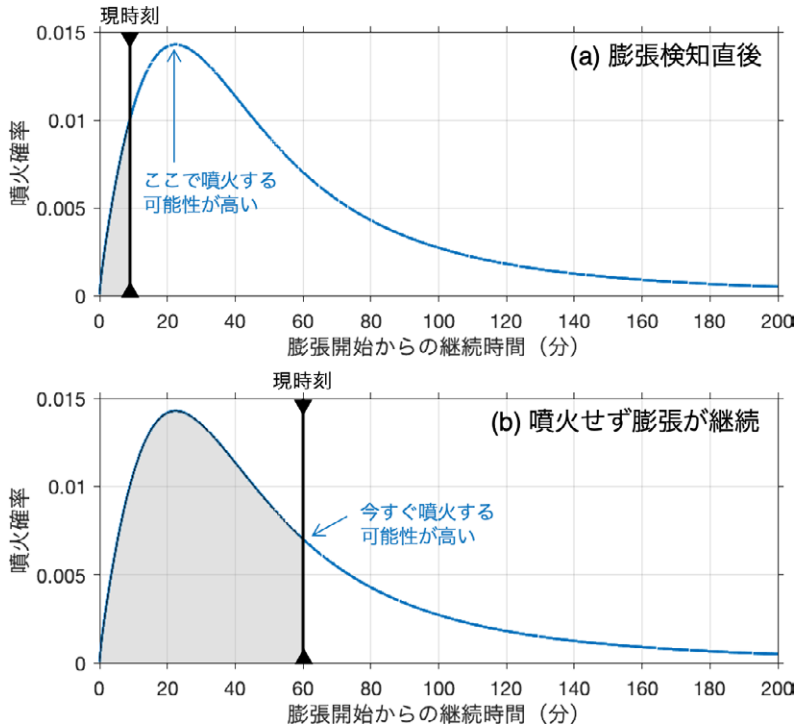


図8 モデル分布を用いた噴火時刻の評価。現時刻が膨張開始からどのくらい経過しているかによって噴火確率が変化する。

すぐに噴火する確率が最も高いという判定に変わる。このように、現在膨張がどのくらい続いているかを踏まえて、噴火時刻を予測できる。また、噴火の規模については、リアルタイムで得られる山体の膨張量から予測可能である。現在の膨張率のまま変動が継続すると仮定すれば、上記で予測した噴火発生時刻での膨張量がわかる(図9上)。この膨張量のうち、噴火時にどのくらい収縮するのが噴火の規模を規定する。したがって、収縮量のシナリオをいくつか用意して(たとえば、収縮量が「膨張量の2倍」、「膨張量に等しい」、「膨張量の半分相当」など)、これらにそれぞれ確率を付与する。

このように評価することで、噴火時刻と噴火規模の異なるいくつかのシナリオを提示して、各々の発生する確率を算出することができるようになる(図9下; Ishii & Iguchi, submitted)。時刻も規模も一意に決め

## 桜島ブルカノ式噴火の確率的噴火予測にむけて

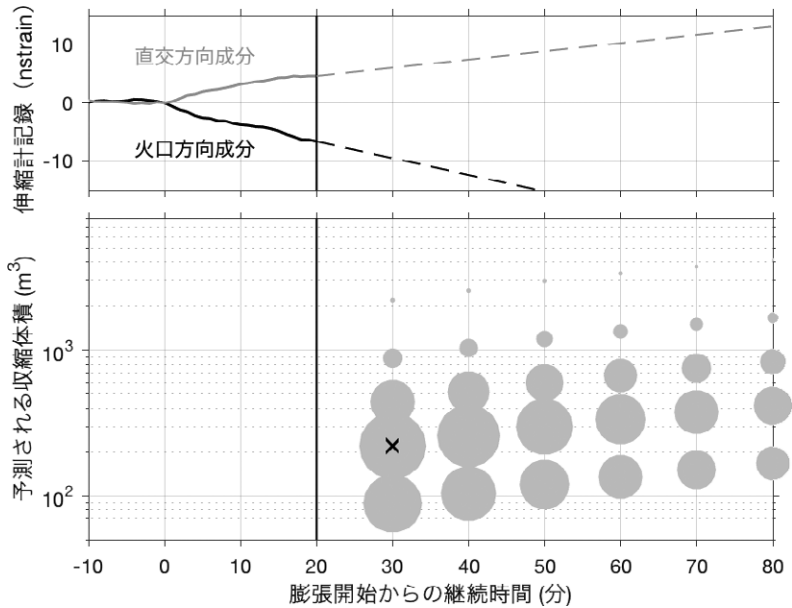


図9 噴火時刻と規模の同時評価の例。リアルタイムで観測される伸縮計記録（上）から現時刻（縦黒線）以降の変動を予測する。下図のバブルの大きさは、噴火時刻（横軸）と噴火規模（収縮体積；縦軸）の組み合わせが起こり得る確率の高さを表す。

することはできないが、どのシナリオの確率が高く、逆にどのシナリオの確率が低いかは示すことができる。さらに、それぞれのシナリオを仮定して降灰シミュレーションを実施すれば、降灰分布についても確率の大小を示すことができるようになる。このような予測は、火山のそばで暮らす鹿児島県民にとってより有益な情報になるだけでなく、世界的にみても画期的な試みである。

## 5 今後の展望と課題

上記のような予測方法を採用することで、噴火予測や降灰予測が観測データを踏まえた現実的な情報になる。しかし、より予測精度を上げるために検討すべきことも多く残る。最後に今後の課題を以下に挙げる。

確率算出時の課題のひとつは、噴火未遂の問題である。桜島では、比較的大きな山体の膨張が観測されているにもかかわらず、ほとんど火山

灰を噴出せずに膨張が解消されるケースがある (Iguchi et al., 2022)。このような現象が起ると、大きな被害（降灰）が発生しないにもかかわらず、リスクを過大評価してしまう。今後、より詳細に発生条件等を調べて、確率の算出過程に組み込む必要がある。また、確率算出に使用するモデル分布を火山の長期的な活動度に合わせて変えていく必要もあるかもしれない。実際、深部のマグマだまりから桜島にマグマが多く供給された時期とそうでない時期とでは、噴火の頻度や規模が変わっているようである。現在の活動度に合わせたモデルを使って確率を計算することで、予測精度の向上につながるかもしれない。また、他の観測データを参照することも役に立つ可能性がある。たとえば、桜島の噴火の直前には山体の膨張が停滞し、少し収縮してから噴火することが多いとされている。この膨張の停滞をうまく検知して現在のやり方に組み込むことができれば、さらなる予測精度の向上が期待できる。

予測精度向上の技術的な取り組みと並行して、推定した確率をどのようにアウトプットするのかについても十分な検討が必要だろう。確率が数値として示されることは、分かりやすさにつながる一方で誤解を生む可能性も高い。確率が低いからといって危険性を過小評価してしまったたり、逆に過度に恐れて風評被害等が生じてしまうこともある。行政などの意思決定者が確率的表現の意味を正しく把握して、予測の不確実性のもとで意思決定をする（絶対的な確信が持てない状況で決断を下す）プロセスを理解する必要性も指摘されている（たとえば Marzocchi & Woo, 2007; Marzocchi & Bebbington, 2012）。火山学者は予測精度の向上に尽力しながらも、決定論的議論の難しさや確率的表現の捉え方を一般に周知していく努力が欠かせないだろう。

## 謝辞

本稿で紹介した桜島での火山観測・研究は、京都大学防災研究所火山活動研究センターの井口正人教授をはじめとするスタッフの方々によって実施されたもの、およびサポートいただいたものです。また、本研究は次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの支援を受けました。有村観測坑道のデータは国土交通省大隈河川国道事務所より提供いただきました。ここに記して感謝申し上げます。



## 参考文献

- Hotta K, Iguchi M, & Tameguri T (2016) Rapid dike intrusion into Sakurajima volcano on August 15, 2015, as detected by multi-parameter ground deformation observations. *Earth, Planets and Space*, 68: 68.
- Iguchi M, Tameguri T, Ohta Y, Ueki S, & Nakao S (2013) Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 58(1): 115–135.
- Iguchi M, Yamada T, & Tameguri T (2022) Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by Non-Eruptive Deflation. *Frontiers in Earth Science*, 10: 727909.
- Ishihara K (1990) Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In: Ryan M (ed) *Magma Transport and Storage*, 335–356. John Wiley & Sons.
- Ishii K & Iguchi M (submitted to JVGR in Sep 2023) Statistical features of the ground deformation of Vulcanian explosions at Sakurajima volcano.
- Kamo K & Ishihara K (1989) A preliminary experiment on automated judgement of the stages of eruptive activity using tiltmeter records at Sakurajima, Japan. In: Latter J (ed) *Volcanic Hazards: Assessment and Monitoring*, 585–598. Springer.
- Marzocchi W & Bebbington M (2012) Probabilistic eruption forecasting at short and long time scales. *Bulletin of Volcanology*, 74: 1777–1805.
- Marzocchi W & Woo G (2007) Probabilistic eruption forecasting and the call for an evacuation. *Geophysical Research Letters*, 34: L22310.
- 下鶴大輔、後藤賢一、野添進 (1957) 桜島袴腰に於ける土地伸縮観測、火山、第2集、2(1): 1–5.
- 村田剛志、ヒープ レ、井口正人 (2018) Stacked Recurrent Neural Network による桜島噴火予測、第32回人工知能学会全国大会論文集.
- 吉川圭三 (1957) 桜島における地盤変動の観測について、京都大学防災

想林第15号

研究所年報、1: 106-111.

(京都大学防災研究所火山防災連携研究ユニット特定助教)