

火山観測から火山防災へ

From Volcano observation to Volcanic Disaster Risk Reduction

井口正人

Masato IGUCHI

Synopsis

This paper describes the characteristics of volcanic eruptions obtained from observations at Sakurajima, Satsuma-Iwojima, Kuchinoerabujima, and Suwanosejima in the Ryukyu Islands, and Guntur and Merapi volcanoes in Indonesia, and how the characteristics of volcanic activity revealed by the observation can be linked to forecasting eruption and hazard assessment. Since 1955, Sakurajima has been experiencing Vulcanian eruptions that cause damage due to falling volcanic bombs and air-shocks. Tiltmeters and strainmeters installed in underground tunnels have enabled us to detect the uplift and inflation of the volcanic body as a precursor to a Vulcanian eruption. B-type earthquakes that precede a Vulcanian eruption are accompanied by Strombolian eruptions and degassing. This results in the formation of a lava dome and underlying gas pocket. Volatile content is an important parameter in forecasting eruption style. As on Sakurajima, the segregation of hypocenters of A-type and B-type earthquakes is identified at Satsuma-Iwojima and ground uplift preceding eruptions is detected at Suwanosejima. The precursors to the 2015 eruption at Kuchinoerabujima were stronger than those of the 2014 eruption. It was necessary to forecast the hazard factors and their extent from the observed phenomena, however the alert zone based on the observation could not extend prior to the 2015 eruption. The energy of seismic activity preceding the 2010 eruption at Merapi Volcano allows to forecast the extent of pyroclastic flow that occurred after the seismicity. A support system for decision making was developed in Indonesia to utilize the forecasting for warning announcements. It is necessary to evaluate the types of hazards and their extent from observation data. Hazard assessment is important for Sakurajima, where a large-scale eruption is expected to occur in the future based on the amount of ground uplift in the Aira caldera, and should be reflected to alert zone of Level 5 (evacuation) warnings issued by the JMA.

キーワード: 桜島, 薩摩硫黄島, 口永良部島, 諏訪之瀬島, グントール火山, メラピ火山, 火山観測, 噴火ハザード, 火山災害

Keywords: Sakurajima, Satsuma-Iwojima, Kuchinoerabujima, Suwanosejima, Guntur, Merapi, volcano monitoring, eruption hazard, volcanic disaster

1. はじめに

京都大学防災研究所に附属桜島火山観測所が設置されたのは1960年12月26日のことである。桜島では1955年10月13日に南岳山頂において突如として爆発が発生した。同年の噴火活動は10月に発生した数回の爆発であったが、翌1956年になると爆発が頻発す

るようになった。当時、理学部教授で、防災研究所第一部門の教授を併任していた佐々教授は同年6月に桜島火山活動の調査を行い、桜島の噴火活動は長期化するという見通しを立てた。実際、噴火活動開始から70年近くが経過した2024年でも桜島の噴火は依然として繰り返されている。その見通しを受けて鹿児島県など地元は国に恒久的な観測・研究施設の設

置を求める要望活動を行い、文部省令により京都大学防災研究所に桜島火山観測所が設置されることとなった。京都大学が担当することになったのは、すでに1928年に理学部附属の火山研究施設が阿蘇山に設置されており、京都大学は九州に火山観測・研究の拠点を持っていたことによる。1981年4月に理学研究科修士課程に入学した私は、同年6月に桜島火山観測所に助手として赴任し、観測・研究に従事することとなった。

桜島火山観測所に勤務しつつ、桜島よりもさらに南にある離島の活火山も観測・研究の対象とした。わが国には111の活火山が存在する。活火山とは1万年以内に噴火した証拠が確認された火山であるが、桜島はこれらの火山の中でも最も活動的な火山である。桜島のさらに南方海上の南西諸島には、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島などの活火山がある。これらの火山の活動度は全国的にみても高い。桜島火山観測所は、私が赴任する以前からこれらの火山の調査観測を繰り返していたが、離島であるがゆえに桜島のような常時観測は実施されておらず、火山噴火の発生予測のためには観測の常設化は解決すべき必須の課題であった。

さらに世界に目を向けてみると、多数の火山が環太平洋火山帯を形成しており、日本列島はその北西部にある。Global Volcanism Program (Smithsonian Institute) によれば世界には1328の完新世火山があるが、米国、ロシア、日本、インドネシアの火山数が多い。このうち、インドネシアの火山は、活動度が高いだけでなく、火山近傍に多数の住民が居住しているため、過去に大規模な火山災害が繰り返されてきた。インドネシアにおける火山と人の近さは、日本の状況と同様である。鹿児島市街地は桜島南岳山頂から10kmの距離にあり、海峡により隔てられた陸地同志の距離はわずか2kmである。火山災害は防災研究所として必ず取り組まなければならない課題であり、そのためにはインドネシアの火山の噴火活動と火山災害について研究することは我が国へのフィードバックも大きい。防災研究所は1990年代にアジア地域を対象に国際防災10年事業に取り組んだが、それにはインドネシアの火山研究も含まれる。これを契機に30年間、インドネシアとの国際共同研究を続けてきた。

1981年4月に理学研究科修士課程に入学した私は、同年6月に桜島火山観測所に助手として赴任したが、京都からみれば桜島は南にあり、南西諸島の火山群はその南にある。インドネシアの火山はさらにその南にあるので、防災研究所の研究発表講演会では「To the South」と題して43年の在職期間に行ってきた観測・研究の一部について講演をさせていただいた。

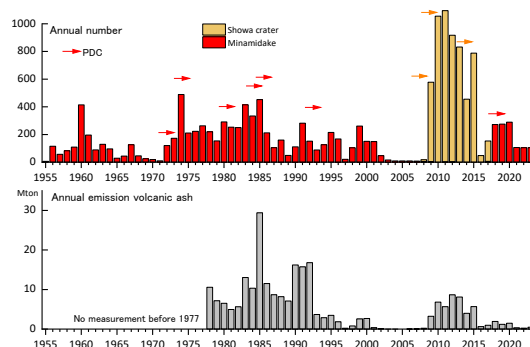


Fig. 1 Annual numbers of explosive eruption at Sakurajima (top) and annual emission of volcanic ash during the period from 1955 to 2023. The explosive eruption is discriminated by air-shock ≥ 10 Pa at Harutayama, 2.7 km from the Minamidake crater.

本稿では、桜島（第2章）、南西諸島火山（第3章）、インドネシアの火山（第4章）、今後予想される桜島大規模噴火（第5章）を対象に、火山観測から得られた噴火の火山噴火の特性と、明らかにされた火山活動の特性をどのように噴火の発生予測とハザードの評価につなげていくかについて述べる。

2. 桜島南岳の火山活動

桜島は鹿児島湾北部の始良カルデラの南の縁に形成された後カルデラ火山であり、噴火活動は26,000年前から5,000年前までの北岳の活動とそれ以降の南岳の活動に分けられる。有史以降では、小規模な山頂噴火と山腹における大規模噴火を繰り返してきた。最近550年では、文明（1471年～1476年）、安永（1779年～1782年）、大正（1914年～1915年）の3回の大規模噴火が発生した。1955年以降は、山頂噴火活動期であり、南岳山頂とその東の昭和火口において噴火活動が繰り返されている。

2.1 1955年以降の山頂噴火活動

1955年から2023年までの年間の爆発回数と火山灰放出量推定値をFig. 1に示す。ここでいう爆発はハルタ山において空振振幅が10Pa以上の噴火である。また、火山灰放出量推定値は鹿児島県内の南岳から50 km以内62観測点（鹿児島県）における月別降灰量から求めたものである。

過去69年間の噴火活動は4つの活動期に分けられる。1960年に爆発回数のピーク（414回）を持つ第1活動期はブルカノ式噴火が繰り返された。1971年には年間爆発回数が10回まで低下したが、1972年9月から爆発が頻発するようになり、10月2日の爆発では南岳

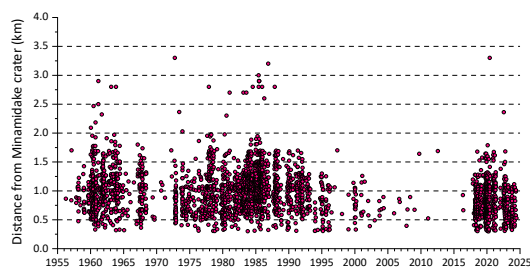


Fig. 2 Flight distance of volcanic blocks ejected by Vulcanian eruptions at Minamidake crater of Sakurajima.

山頂から3.2km離れた古里温泉の海岸まで火山岩塊が落下した。この爆発は第2活動期の開始を告げる象徴的な爆発と言える。第2活動期は、ブルカノ式噴火の発生回数が多いが、ストロンボリ式噴火や火山灰が連続的に放出される噴火（以下、連続噴火）もよく発生した。その結果、1985年に2960万トンの火山灰が放出されたのをはじめとして年間火山灰量が1000万トンを超えることも多く、降灰量が最も多かったのがこの時期である。

第2活動期は21世紀に入り急速に衰えたが、かわって2009年からは昭和火口における爆発回数が急増した（昭和火口活動期）。昭和火口は1946年に溶岩を流出した火口であるが、その後静穏であった。2006年と2007年にマグマ水蒸気噴火が繰り返され（宮城・他、2010）、2008年からはマグマ噴火に移行していた。2011年には1095回の爆発が発生したように第2活動期よりも回数が多い。一方、火山灰量は第2活動期よりも少ないので、小規模爆発が頻発した時期と言える。なお、この活動期における南岳火口の爆発は3回に過ぎない。

ところが、2017年10月30日から噴火活動が概ね南岳に回帰し、その状態が現在まで続いている（第3活動期）。この時期における爆発の定義を満たす噴火回数は過去の活動に比べてそんな色ないが、火山灰量が年間200万トン以下と激減している。

2.2 火山災害要因としてのブルカノ式噴火

このような1955年以降の桜島の噴火活動における噴火災害の要因は火山岩塊、火山レキ、火山灰、空気振動、土石流である。このうち火山岩塊、火山レキ、空気振動による災害はブルカノ式噴火により発生した。

Fig. 2に南岳爆発に伴う火山岩塊の到達距離を示す。距離2.5km以上の距離に飛散した火山岩塊は現地調査によってその位置が確認されているものである。2.5km未満の火山岩塊については、気象庁が発行する火山観測報にある合目の記載に基づいて、合目の距

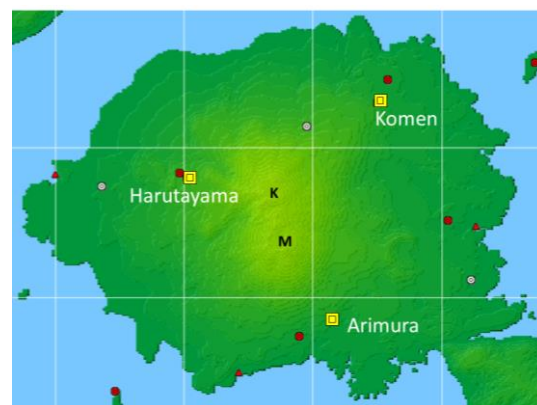


Fig. 3 Location of underground tunnels at Sakurajima volcano. Yellow squares indicate underground tunnels. “K” and “M” are craters of Kitadake and Minamidake.

離範囲における乱数（確率一定）で距離を与えた。2022年7月24日の爆発では、火山岩塊が火口からの距離2.4kmを超えて飛散したとして気象庁はレベル5の噴火警報を発表したが、それ以前でも20回のレベル5の噴火警報に相当する爆発が発生したことが分かる。明らかに火口からの距離3km以上に火山岩塊が到達した爆発は3回ある。1972年10月2日と1986年11月23日の爆発では火山岩塊が古里町の海岸まで達し、2020年6月4日の爆発では東桜島町に落下した。特に、1986年の爆発では火山岩塊がホテルを直撃して負傷者もでた。それ以外にも家屋を直撃あるいは近傍に落下した事例も多い。また、爆発に伴う空気振動も強く、山麓において1000Paを超える空気振動が観測されたこともある。この強い空気振動により窓ガラスがよく破壊された。確認されているだけでも36回のブルカノ式噴火で窓ガラスの破損が報告されており、特に、1984年と1985年が多い（井口・山田、2021）。

2.3 ブルカノ式噴火の発生予測研究

火山においてはA型（火山構造的）地震、B型（低周波）地震、爆発地震、火山性微動など多様な種類の地震が観測される。このうち、爆発地震はブルカノ式噴火に伴って発生し、最も振幅が大きく、初動も明瞭であることが多い（Minakami, 1974）。1970年代にはすでに震源位置が海面下0–2kmに決められており（西、1970）、初動は全方位に押しであることは早い段階で分かっていた（山里、1987）。さらに、波形の解析から初動は等方膨張、それに続く引き波は円筒型の収縮、さらにその後のレーリー波は極浅部の等方膨張と水平収縮により引き起こされていることが明らかになっている（Tameguri et al., 2002）。すなわち、ブルカノ式噴火に伴う爆発地震は最も研究対象になりやすいのである。

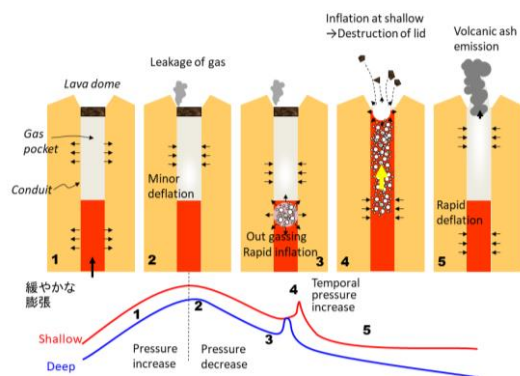


Fig. 4 A model of Vulcanian eruptions based on decompression and vesiculation of high-pressure magma.

ブルカノ式噴火に先行して、まずA型地震が、次いでB型地震が多発することが知られている (Minakami, 1970)。桜島においても1970年代は同様の経過をとって爆発活動が活発化した (加茂, 1978)。1980年代に入るとA型地震の発生頻度は低下したが、ブルカノ式噴火発生前にB型地震の群発が発生することが頻繁にあった。鹿児島地方気象台はB型地震群発をもってしばしば臨時火山情報を発表して爆発活動に注意を促した。

ブルカノ式噴火に伴う地盤変動もよく観測されている。桜島火山観測所の草創期から観測壕を用いた地盤変動の観測は行われていたが、ブルカノ式噴火に伴う地盤変動を明瞭にとらえるには至っていなかった (江頭, 1966)。これを解決したのが溶岩ドームを掘削して1985年に完成したハルタ山観測坑道 (Fig. 3) であり、坑道内には水管傾斜計と伸縮計 (基線長28m) が設置された (Kamo and Ishihara, 1989)。これらの観測機器によりブルカノ式噴火に同期する南岳火口方向が沈降する傾斜変化と収縮ひずみを捉えただけでなく、噴火に前駆する南岳火口方向の隆起傾斜変化と膨張ひずみを検知することができた (Ishihara, 1990)。観測坑道が新設された当時はB型地震群発が最も有効な予測手段であったが、観測坑道における火口方向の隆起傾斜と膨張ひずみの検知は、ブルカノ式噴火との対応関係においてそれをはるかに上回るものであった。B型地震の群発はそのままブルカノ式噴火の発生に直結する場合もあれば、群発からブルカノ式噴火の発生までの時間は活動毎にまちまちである (上田・宇平, 1988) が、地盤の膨張・隆起はブルカノ式噴火に直結するからである (Kamo and Ishihara, 1989)。2006年には国土交通省九州地方整備局大隅河川国道工事事務所により南岳南麓の有村 (Fig. 3) にも坑道が設置され、この頃から噴火活動を開始した昭和火口に近いことから90%のブルカノ式噴火に対して前駆的な地盤の膨張・隆

起を検出することに成功した (Iguchi et al., 2013)。

2.4 揮発性成分の重要性

このようにブルカノ式噴火に関する研究はハザード要因としての重要性和観測のしやすさから大きく進展してきた。しかし、依然として謎であるのはなぜ等方膨張 (Tameguri et al., 2002) により始まる爆発地震は火道最上部に形成された溶岩ドーム破壊に対応する空気振動の発生より1秒以上も先行 (Ishihara, 1985) するかである。Kanamori et al. (1984) のモデルによれば、高压粘性マグマを封入する蓋が取れることにより、下向きのシングルフォースと収縮力源が働くことになっている。マグマの圧力が高まれば蓋は取れるが、先行する等方膨張との関係を明らかにする必要がある。

ブルカノ式噴火発生直前の地盤変動を詳しく見てみると、噴火発生前に小規模な収縮が始まっている。ブルカノ式噴火の発生により、前駆的な隆起・膨張は沈降・収縮に反転するが、その転換点は噴火の開始に対応せず、それ以前に沈降・収縮に転じているのである。これを時系列に沿ってまとめると、小収縮、爆発地震の膨張、蓋 (溶岩ドーム) の破壊というプロセスをとる。このプロセスは諏訪之瀬島やインドネシアのスメル火山の爆発でも時間スケールは異なるが同様にみられる (Iguchi et al., 2008)。

このような一連のプロセスはFig. 4に示すモデルにより解釈される (Iguchi et al., 2008)。1: ブルカノ式噴火発生前には火道最上部に蓋としての溶岩ドーム、その下にガスたまりが形成されている (Ishihara, 1990)。火道にマグマが貫入し火道内の圧力が上昇する。2: 火道内の圧力が上昇すると火道最上部からガスがリークする。爆発直前のガスリークは桜島や諏訪之瀬島で見られる現象である。ガスのリークによりガス溜まりの圧力は低下する。3: ガス溜まりの下に水に飽和したマグマが存在するとすれば、圧力低下により発泡が始まり、急激に体積が増加する。これが、爆発地震の初動を励起する等方膨張に対応する。4: 発泡して体積が増加したマグマは急速に火道内を上昇し、蓋を破壊する。これが、ブルカノ式噴火の開始に対応する。圧力をみてみると、2の段階において低下が始まるが、3と4の段階では一時的に高まる。5では蓋が破壊された火道からは火山灰と火山ガスが噴出し、急激な収縮が始まり、圧力も低下する。この一連の現象の解釈において、爆発地震の等方膨張は水に飽和した高压マグマの減圧による発泡現象であり、少なくともブルカノ式噴火は揮発性成分 (水) を含んだ高压マグマの減圧発泡現象とみることができる。以上のことから揮発性成分がブルカノ式噴火発生に極めて重要な役割を果たしている

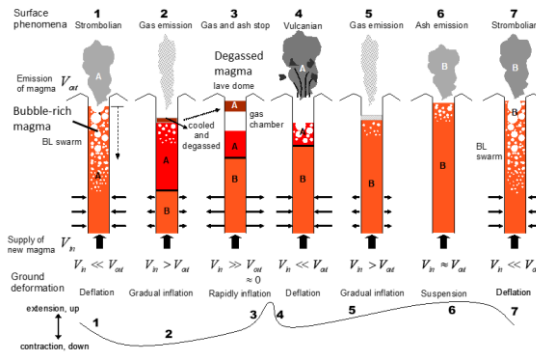


Fig. 5 A model of Vulcanian eruptions based on decompression and vesiculation of high-pressure magma.

考えられる。

2.5 揮発性成分がより強く関与する噴火様式

ブルカノ式噴火発生には揮発性成分が重要な役割を果たすが、火山噴火には揮発性成分がより強く関与する噴火様式がある。代表的な様式に軽石を噴出するプリニー式噴火があげられる。桜島の大正噴火はプリニー式噴火が1月12日の10時ごろに始まり、噴火活動は1日程度続いた。13日の20時ごろには火砕流が発生し、その後、溶岩が流下しているのが確認されている（小林，1982）。この一連の噴火活動の推移はマグマからの脱ガスの進行過程を見ていると考えればよい。噴火活動の初期段階においてプリニー式噴火が発生することは、揮発性成分を多量に含むマグマが貫入したことを意味する。噴火活動の最終段階では、プリニー式噴火によって脱ガスしたマグマの溢れ出しである溶岩流出に至っている。

桜島の南岳噴火活動期におけるストロンボリ式噴火は、Fig.5の1に示すようにマグマからの揮発性成分がoutgassingしながら噴火する現象である。その後、発生するブルカノ式噴火発生前には溶岩ドームとガスたまりが分離しており（Fig.5の3）、ブルカノ式噴火の主要な噴出物は脱ガスマグマと考えられる。このことは、火山灰にする付着する火山ガス水溶性成分の量が、ストロンボリ式噴火に比べブルカノ式噴火において少ないことにより推定される（Nogami et al., 2006）。ストロンボリ式噴火は脱ガス前の揮発性成分を多量に含む新鮮なマグマの噴出と言える。

ストロンボリ式噴火はBL型地震（先に述べたB型地震のうち、1–3Hzの低周波成分が卓越するものでB型地震の大半を占める、Iguchi, 1994）の群発を伴う。したがって、B型地震が爆発に先行して多発することは、ストロンボリ式噴火からブルカノ式噴火への推移を意味する。これをマグマに含まれる揮発性成分からみると揮発性成分を多量に含むマグマの火口底

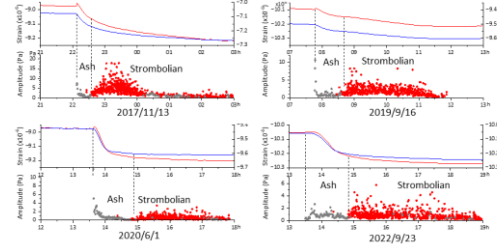


Fig. 6 Transition of eruption style from ash emission to Strombolian eruption. Upper graph in each panel shows strain change in Harutayama (Fig. 3) underground tunnel. Red and blue curves represent radial and tangential components to the Minamidake crater, respectively. Lower graph in each panel shows change of infrasound amplitude. Grey and red dots represent ash emission and Strombolian eruption, respectively. Ash emission and Strombolian eruption are discriminated by waveform pattern.

への上昇過程から脱ガスマグマの排出への過程とみることができる。

この過程をFig.5（立尾・井口，2009）に示す。火道内を揮発性成分に富むマグマが上昇し、火口底まで達する。この時、ストロンボリ式噴火が発生し（1）、噴火に伴い脱ガスとマグマの結晶化が進行する（2）。その結果、火口底には溶岩ドームが、その下にはガスたまりが形成される（3）。ストロンボリ式噴火によって火道内を火口底まで上昇して脱ガスしたマグマをAとする。ブルカノ式噴火は、膨張性の先行地盤変動から推定される深さ2-6kmへのマグマ貫入によって引き起こされていると考えられているので（Ishihara, 1990）、このマグマをBとする。Bマグマの貫入により、Aマグマがブルカノ式噴火の発生として排出される。（4）Aマグマがすべて排出されるまでブルカノ式噴火は繰り返されるので、ストロンボリ式噴火後にブルカノ式噴火の発生回数が増加する。Aマグマがすべて排出されると（5）、Bマグマは火道内を上昇することができ（6）、減圧により再びストロンボリ式噴火の活動へ移行する（7）。南岳第1および第2活動期においてB型地震群発は典型的なブルカノ式噴火の前兆現象に位置づけられていたが、それでもB型地震群発後にブルカノ式噴火が発生しないことやB型地震群発なしにブルカノ式噴火が発生したことも多い。ブルカノ式噴火の発生には脱ガスマグマの存在と揮発性成分に富むマグマの新規貫入が必要とするFig. 5のモデルに基づいて考えると、B型地震群発後にブルカノ式噴火が発生しないことはBマグマの貫入がなかったことを意味する。逆に、B型地震群発なしにブルカノ式噴火が発生したことは、

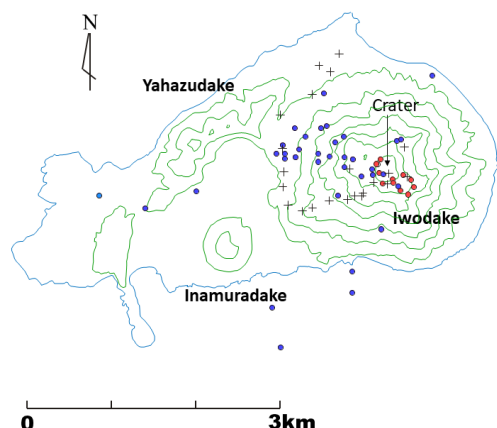


Fig. 7 Hypocenter distribution at Satsuma-Iwojima volcano. Blue and red dots represent the locations of A-type and B-type earthquakes, respectively. Crosses are locations of seismometer.

脱ガスマグマAが長時間存在し続けた火道に、Bマグマが貫入したことを示唆する。

2.6 脱ガスマグマの排出

このように桜島の噴火では、排出されるAマグマと噴火を駆動するBマグマを異なる時期に貫入したマグマと考えれば噴火過程をうまく説明できる場合が多い。南岳の山頂噴火活動期においては、ブルカノ式噴火とストロンボリ式噴火に加え、火山灰連続放出も代表的な噴火様式に位置づけられ、この様式による火山灰放出量が最も多い(井口・他, 2019)。南岳第3活動期においては、火山灰放出が1~2時間継続した後、ストロンボリ式噴火に移行するケースがいくつか認められる。この噴火様式の変化に伴う地盤変動と空気振動の振幅変化をFig. 6に示す。火山灰が連続的に放出されるときには、連続微動状の空気振動が観測されるが、ストロンボリ式噴火では空振パルスが数秒の間隔で頻繁に繰り返され、振幅も増大する。一方、地盤変動は火山灰連続放出の方がストロンボリ式噴火活動よりも圧倒的に大きい。このことからこの一連の噴火活動において火山灰のほとんどは、最初に発生する火山灰連続放出で噴出されることがわかる。この火山灰は脱ガスマグマであるAマグマに対応するが、排出する駆動力はその後発生するストロンボリ式噴火に対応するBマグマである。Fig. 6に示した噴火発生前には、膨張・隆起を示す地盤変動が5日から7日継続した。これはBマグマの火道内への貫入に位置づけられる。

3. 活動的な南西諸島の火山群

桜島を含む霧島火山帯は我が国において最も活動的な火山地帯である。21世紀でも霧島、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島においては噴火が発生している。薩摩半島より南の火山はすべて島であるが、離島であるが故の火山研究の難しさは、有史以降における噴火の文書記録が最近200年程度に限られることと、社会インフラの整備の遅れによる観測点整備が進まなかったことにある。ここでは、京都大学防災研究所による火山観測点の整備によって明らかとなった薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島の3火山の噴火活動の特性と防災対応の課題について述べる。

3.1 薩摩硫黄島

薩摩硫黄島は薩摩半島南端の開聞岳から48km南南西にある火山島であり、鬼界カルデラの北西縁に位置する。薩摩硫黄島の主峰を形成する硫黄岳において1000年以上火山ガスの噴出が続いているが、記録に残る噴火活動は海底噴火から昭和硫黄島を形成した1934年の噴火が最も古い(田中館, 1935)。最近では2013年、2018年、2024年に硫黄岳で小規模な噴火が発生している。

京都大学防災研究所で長期的な火山性地震観測を行ったのは、1976年から1978年のサンシャイン計画に基づく委託事業に遡り、多数のA型地震が観測されている(加茂, 1976; 1977; 1978)。1988年1月には硫黄岳が噴煙を上げたという通報があり、これを契機に火山性地震の常時観測を行うことになった。常時観測とはいいいながら、トリガー方式により地震波形を収録し、ダイヤルアップ方式で波形ファイルを伝送するものであった。地震動振幅の1分間の最大値や長周期データを収録する機能も付加した(Iguchi, 1991)。1995年には地震計を硫黄岳北西山麓に移設し、検知力を増強した。

1996年6月8日に島内で有感となる火山性地震(マグニチュード2.9)が発生した後、硫黄岳の火口付近に割れ目が形成され、噴気活動が活発化、さらに火口が拡大した(Iguchi et al., 2002)。火山灰を噴出する活動は1998年から2004年ごろまで続いた(気象庁, 2013)。この活動期に硫黄岳周辺に多数の地震計を設置することにより火山性地震の高精度震源決定を行った(Iguchi et al., 2002)。A型地震は硫黄岳山体に広く分布するのに対し、B型地震は硫黄岳火口直下に局所的に分布することが分かった(Fig. 7)。このような火山性地震の震源位置の棲み分けは桜島の場合(Iguchi, 1994)と同様である。

3.2 諏訪之瀬島

諏訪之瀬島は、屋久島から奄美大島の間にあるト

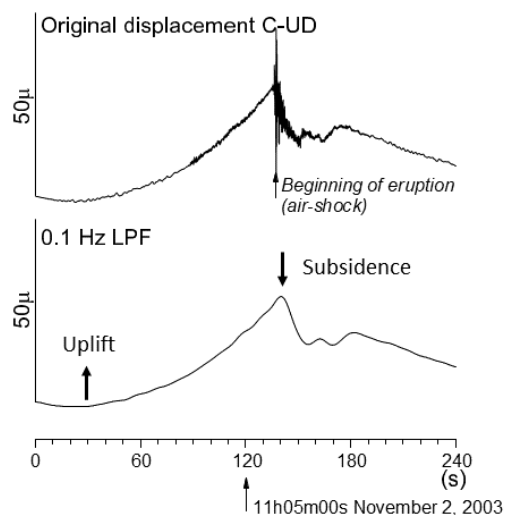


Fig. 8 Seismogram associated with eruption at Suwanosejima volcano. Upper: Displacement seismogram integrated from velocity seismogram (STS-2). Lower: Low-pass filtered displacement.

カラ列島のほぼ中央に位置する。諏訪之瀬島は鹿児島市の南南西240kmの海上にある安山岩質の火山島である。わが国で最も活動的な火山の1つである。諏訪之瀬島の火山は富立岳、須崎、御岳、ナベダオなどの火山からなる（平沢・松本，1983）。最高峰である御岳山頂には馬蹄形カルデラが北東に開いている。1813年には島の西側の海岸まで火砕流と溶岩流が達する規模の大きい噴火が発生した。この噴火の過程についてはその詳細が嶋野・小屋口（2001）により明らかにされている。噴火活動の最終段階において御岳山頂から北東に崩壊し、馬蹄形カルデラが形成されたとされる。その後、カルデラ内で1883年に溶岩流出し（明治溶岩流）、20世紀においても馬蹄形カルデラの中に形成された火口において噴火が繰り返され、特に1950年代からは頻繁にストロンボリ式あるいはブルカノ式噴火を繰り返している。

1989年には、薩摩硫黄島と同様のダイヤルアップ観測方式で常時観測を開始した。2003年には、御岳火口から1km以内の近接した4カ所に広帯域地震計を設置し、爆発地震のメカニズムを解明するための観測を開始した。このころには、データ伝送は、ダイヤルアップ方式から400MHz帯デジタル無線（RM300、白山）と地上回線（ISDN）を連結したIPパケット伝送に変更された。

諏訪之瀬島の爆発地震については、初動の押し引きについて多様な形式をとることが報告されているが（西・他，1993）、近接観測を行うことにより、初動は引きで始まり、それに引き続いて強い押しパル

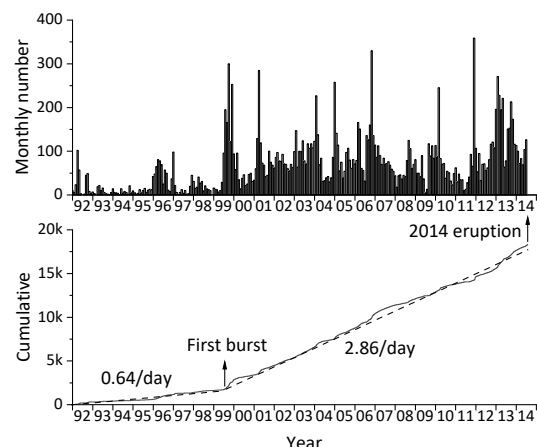


Fig. 9 Seismicity of volcanic earthquake at Kuchinoerabujima volcano till August 3, 2014. Volcanic earthquakes with maximum amplitude $\geq 10 \mu\text{m/s}$ at station KUC (0.4 km west of Shindake) are counted. Upper: monthly number. Lower: Cumulative number.

スが到来することがわかった。また、引き波である初動の震源は、200～300mの深さであるが、直後の押し波はそれと同等かやや深い場所から放出されている（為栗・他，2004）。注目すべきは広帯域地震計の変位記録では、爆発発生約1分前から上方への変位が始まり、爆発の発生とともに、下方への変位に転じることである（Iguchi et al., 2008）。Fig. 8に上下変位記録の例を示す。桜島のブルカノ式噴火に見られる前駆膨張・隆起と噴火に伴う収縮・沈降を考えれば当然のことであるが、諏訪之瀬島の小規模噴火でも同様に膨張・隆起から噴火に伴う収縮・沈降が見られることが分かった。その前駆上昇時間は1分程度と桜島に比べてはるかに短い。

3.3 口永良部島

口永良部島は、屋久島の西方約14kmにある安山岩質の火山島である。島の中央部に新岳、古岳、野池などが火口丘を形成する。記録に残されている最古の噴火は1841年5月23日に新岳において発生しており、西山麓にある集落が焼失した。それ以降の噴火は新岳火口あるいはその東の割れ目から発生している。口永良部島は昭和初期に活動的であり、1931年、1932年、1933年から1934年にかけて比較的規模の大きい噴火が発生した（本間，1934；田中館，1935）。特に1933年12月24日から翌年1月11日までの爆発は破壊的であり、新岳南東の距離1.9kmにある七釜集落が噴石によって全滅した（死者8名、負傷者26名）。1945年には新岳東の割れ目でも噴火が発生した。1966年11月22日の新岳火口における爆発では、新岳の北か

ら東北東にかけて噴石が飛散し、3kmの距離に達した（鹿児島地方気象台・屋久島測候所，1967）．その後も、噴火が繰り返された．1980年9月には新岳の東に形成されていた割れ目から爆発が発生した（京都大学防災研究所・他，1981）．

口永良部島において連続観測を開始したのは、1991年12月のことである．新岳の噴気異常を契機に、新岳火口の西方0.4kmの地点において地震計を設置し、山麓まで無線テレメータにより地震の信号を伝送し、ダイヤルアップ観測方式(Iguchi, 1991)で桜島火山観測所から波形を取得した．2002年には新岳と古岳の山頂付近に地震計を3台増設して、400MHz帯デジタル無線（RM300，白山）と地上回線（ISDN）によるデータ伝送に変更した．また、山麓部にも地震計を新規に設置した．

1980年の噴火から34年が経過した2014年8月3日に新岳の火口において噴火が発生した．この噴火に先立って1999年7月から火山性地震活動の活発化が見られている（Fig. 9）．それ以前の発生頻度は、0.64回/日であるが、それ以降は2.86回/日と、4.5倍に増大していることから、1999年7月を境にして地震活動が活発化したことがわかる（井口，2022）．この火山性地震の多くは、新岳の火口直下極浅部（＜500メートル）に発生する正断層型の火山構造成地震である（Triastuty et al., 2009）．火山性地震の発生頻度の増加は、GNSS観測により捕捉された新岳北西縁の北西方向への変位と隆起に同期している（斎藤・他，2015）．GNSSキャンペーン観測では、圧力源が新岳直下の400m（Hotta and Iguchi, 2017）に求められることから、新岳直下の極浅部の膨張により、火山性地震が活発化したと考えられる．また、GNSS観測による新岳北西縁の北西方向への変位に同期する全磁力変化も2003年頃から検知されており、圧力源と同じ場所における蓄熱を示すと考えられた（Kanda et al., 2010）．同じ時期に新岳火口周辺の地熱異常域の温度上昇と拡大も検知されている（井口，2007）．さらに、2008年10月には、新岳火口の南壁に新たな噴気活動が出現し、最高500mの高さに達する白色噴煙に成長した．このように、新岳火口付近では1999年から地震活動の活発化とそれに同期する地盤の隆起と膨張、2003年から地熱活動の活発化、2008年から火山ガス放出量の増加などが15年間に順次発現した．このような一連の現象は、力学的な膨張・破壊から熱量の増加、さらには火山流体の出現という過程が新岳火口付近の極浅部への集中を経て2014年の噴火に至ったものと解釈できる．

2015年5月29日には、再び新岳において噴火が発生した．この噴火は2014年噴火よりも規模が大きく、噴煙高度は9km以上に達し、火砕流は、北西山麓およ

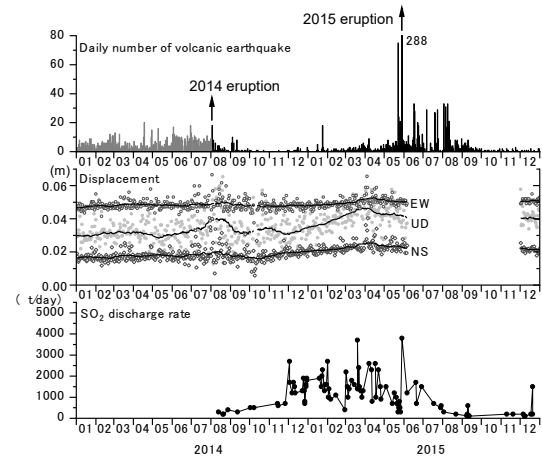


Fig. 10 Increase in volcanic activity prior to the eruption on May 29, 2015. Upper: Daily number of volcanic earthquakes. Gray and black bars indicate counts by Kyoto University and JMA, respectively. Middle: Displacement of GEONET site 970725 (Fig. 1), referred to the 970727 on Yakushima. Curve shows running average of vertical displacement in 30 days. Power outage due to eruptive activity interrupted the observation from June to November 2015. Lower: Discharge rate of SO₂ (Mori et al., 2017).

び西山麓において距離2.4kmまで流下した（Geshi and Itoh, 2018）．2015年噴火では、15年間に及ぶ2014年噴火の前駆現象よりもはるかに活発な火山活動が現れている（Fig.10）．火山性地震活動は2014年噴火の前は無感地震がほぼ新岳火口直下極浅部に集中していたが、2015年噴火に前駆する地震はマグニチュードが大きいだけでなく（2015年5月23日有感，M2.4）、震源域も広い．地盤変動については2014年噴火の前は、新岳火口浅部の圧力源の膨張による局所的な（火口中央から0.5km以内）地盤変動で圧力源の体積変化量も3万m³程度（Hotta and Iguchi, 2017）であったものが、2015年噴火前の2014年12月からは、新岳火口から2.5km程度離れた山麓でも変動が捉えられるようになり、水準測量による上下変動分布から圧力源の深さは7km、体積増加量は260万m³と推定された（Yamamoto et al., 2017）．2014年噴火前は二酸化硫黄ガスの放出率が最大でも300トン/日であったものが、2015年噴火前には4000 トン/日まで増加している（Mori et al., 2017）．2014年噴火前に見られなかった火映が2015年噴火前には検知されたこと（気象庁，2015）は火口内の高温化を示す．2015年噴火発生前の現象は、2014年噴火よりも規模の大きい噴火の発生の可能性を示唆するものであった．

2014年噴火の直前には、急速な火口側隆起の傾斜変化（Iguchi et al., 2017）を除いて地震活動、地盤変

動、地熱活動、火山ガスに顕著な前兆が現れなかったため、2012年にレベル1に引き下げられた噴火警戒レベルは噴火開始時にもそのままであった。気象庁は2014年噴火発生後に警戒レベルを3に引き上げ、警戒を要する範囲を新岳火口から2kmの範囲とした。この範囲は集落に隣接するものであり、噴火の規模がさらに拡大すれば居住地域に噴火の影響が及ぶので、警戒レベルを4または5に引き上げなければならないが、警戒レベルが5に引き上げられ、警戒を要する範囲が拡大されたのは2015年5月29日の噴火の発生後であった。口永良部島では、噴火警戒レベル5に相当する1931年4月2日や1966年11月22日の噴火の直前には有感地震が発生していることが知られており（中野、1932；鹿児島地方気象台・屋久島測候所、1967）、しかも有感地震発生から噴火に至るまでの時間は数時間程度と短く、極めて切迫性が高い。したがって、2015年噴火の6日前の5月23日に発生した有感の火山性地震の発生をもって噴火警戒レベル5に引き上げることは十分根拠がある。有感地震の発生は必ずしも噴火活動を伴うわけではないが、口永良部島2015年噴火の場合は、二酸化硫黄ガスの放出量の増加、山体膨張、火山性地震活動の活発化、地表面温度上昇が順次出現して段階的に火山活動が活発化しているので、噴火警戒レベル5への引き上げの検討においてこれらの現象も考慮しなければならなかった。実際、5月23日に発生した有感地震発生を根拠に筆者は気象庁にレベルの引上げを助言したが、実現しなかった。火山観測網の整備は、異常現象の検知と火山活動評価には貢献したが、避難の意思決定に結びつく警報の発表には役立てられなかったことになる。噴火警戒レベルの定義に基づけば、本来、レベルは、噴火ハザードの評価に基づく警戒範囲の設定の結果として決まるものと考え、現在の予測型ハザードマップはハザード要因ごとの噴出物量を初期条件とするシミュレーションに基づいて作成されている。噴火発生前にモニタリングにより異常現象を検出できるのであれば、モニタリングデータから噴出物量を予測し、それを初期値とするシミュレーションによってハザードを評価すべきである。

4. 世界で最も活発なインドネシアの火山

Global Volcanism Programによれば、完新世に噴火した火山の数は、米国165、日本121、インドネシア116、ロシア115であるが、1800年以降に限れば、インドネシア74、米国63、日本62、ロシア49であり、インドネシアが最も噴火活動が活発であるといえる。また、国土面積を考えると日本の62も噴火活動の活発さを示すものである。エネルギー・鉱物資源省地質庁

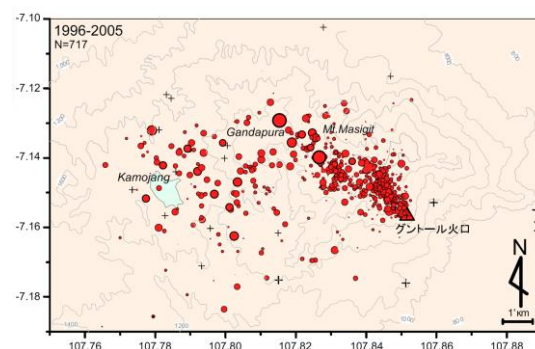


Fig. 11 Epicenter distribution of VT earthquakes at Guntur volcano, West Java, Indonesia. Crosses indicate seismic stations.

の火山地質災害軽減センター（Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation; CVGHM）はインドネシア国内に127の活火山を指定しているが、これらはインド・オーストラリアプレートの沈み込み帯に位置するスマトラ島、ジャワ島、バリ島、ロンボク島から東のヌサ・テンガラ、およびバンダ海プレートに関連するスラウェシ島、マルク島、およびその周辺の島々に分布する。活動的な火口から10km圏内に居住する住民の数は300万人を超えており、火山周辺の居住者数は世界で最も多い火山国である。19世紀から20世紀にかけて犠牲者数が数千人を超える噴火が多数発生した。

4.1 国際共同研究の開始

インドネシアの火山災害発生の状況を考慮し、京都大学防災研究所はインドネシア共和国鉱山エネルギー省鉱物資源総局と国際共同研究を1993年に開始した。防災研究所は、国連による「国際防災の十年」に関連して「中国及びインドネシアにおける自然災害の予測とその防御に関する国際共同研究」事業（1994年～1998年）を実施したが、この事業において火山活動研究センターはインドネシア火山調査所（Volcanological Survey of Indonesia; VSI, CVGHMの前身）と共同して火山観測網の強化を進めた。当時のインドネシアでは数年おきに噴火が繰り返されるMerapi火山（中部ジャワ州）は別格として、それ以外では火山性地震の震源位置を求めることさえできなかった。1994年10月には居住地と観光地が火口から3kmしか離れていないGuntur火山（西ジャワ州）の東南～南西山麓に火山性地震の震源決定を目的として、3地震観測点を増設した（井口・他、1996）。また、震源決定精度向上と発震機構の解明を目的とした臨時多点観測を実施するなど（井口・他、1996；Suantika et al., 1997；Sadikin et al., 2007）、観測網を徐々に強化していった。その結果、得られた火山性地震の震

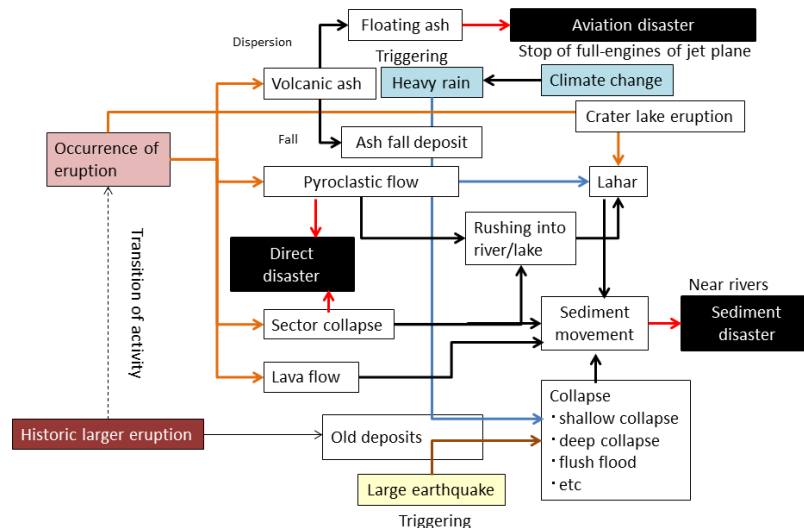


Fig. 12 Various kinds of disaster induced by volcanic eruptions

源分布をFig. 11に示す. Guntur火山では、山頂付近の北西－南東方向の火山列に沿って深さ5km付近まで火山性地震が発生するとともに、西方のKamojangやDarajatなどの地熱地帯を構成するカルデラ下の深さ10kmまでに分布することが明らかになった. 西方の地震の発震機構は横ずれ型になるのに対し、山頂付近では正断層あるいは逆断層型となることが分かった (Suantika et al., 1997 ; Sadikin et al., 2007) .

Guntur火山以外でも、Merapi火山やSemeru火山（東ジャワ州）において観測網の整備を進めた. 小規模爆発が1日100回程度発生するSemeru火山では、噴火直前の火口方向の隆起を示す傾斜変化を捕捉することにも成功している (Nishi et al., 2007; Nishimura et al., 2012) .

4.2 SATREPS

一方、このような火山観測の目的は、火山活動の状況を住民に伝え、必要に応じて避難を促すことにあり、観測網の整備は火山活動に関する情報や警報の精度を向上させるためである. 避難が必要な理由は、火山噴火により噴出物される火砕流や溶岩流は堆積域を壊滅的に破壊し、多くの犠牲者を出す上に、一旦堆積した火山灰や軽石などもその後の降雨などによって土石流や泥流となり、火山近傍はもとより、河川に沿って火山から遠く離れた地域まで到達して被害を拡大させるからである. コロンビアのネバド・デル・ルイス火山において1985年に発生した融雪泥流は山頂から40kmも離れたアルメロまで到達し、25,000人が犠牲となった (Pierson et al., 1990) . 火山噴火による噴出物がもたらす土砂移動現象の複雑さとそれに起因する災害についてFig. 12にまとめた. このような複合土砂災害は、噴火活動の活発な環太

平洋地域はもとより欧州、アフリカ、カリブ海地域など活火山を有する地域ではどこでも起こりうることであり、地球規模課題として抜本的な対策が求められる.

以上のことから、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）において火山噴火予測と土砂災害予測・火山灰拡散予測の研究を融合したプロジェクト「火山噴出物の放出に伴う災害の軽減に関する総合的研究（2013～2018年度）」をインドネシアの火山を対象に実施した.

このプロジェクトのアウトプットは複合土砂災害

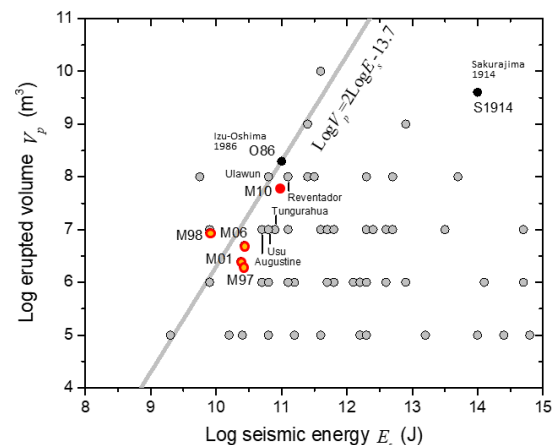


Fig. 13 Relationship between seismic energy before eruption and volume of pyroclastic material ejected in the eruption. Yellow dots labeled M97, M98, M01, M06, and M10 indicate eruptions of Merapi volcano in 1997, 1998, 2001, 2006, and 2010, respectively. O86 and S1914 are the 1986 Izu-Oshima and 1914 Sakurajima eruptions. Gray dots are from White and McCausland (2016).

意思決定支援システム（Support System of Decision Making; SSDM）にまとめられる。SSDMは観測データをもとにハザード予測のためのシミュレーションを行い、その結果を避難等の意思決定に活用するものであり、データを取得するための総合観測システム、火山噴火早期警戒システム、統合GIS複合土砂災害シミュレータ、浮遊火山灰警戒システムから構成される。様々なシナリオに基づき事前に火砕流や溶岩流の流動やラハールの氾濫域がシミュレーション結果としてまとめられたプレアナリシスデータを作

成しておき、観測データからシナリオを決定することにより、プレアナリシスデータベースからハザードマップを抽出する。また、シナリオにおいては火砕流やラハールの発生などを個別イベントとし、それらを事象発生の変換として結合させたイベントチェーンも考慮した。

一例として2010年に大規模噴火（VEI4）が発生したMerapi火山（Surono et al., 2012）において、噴火に前駆する地震エネルギーから評価される火砕流の到達範囲を検討した（Iguchi et al., 2019）。世界の代表的な火山噴火について噴火に前駆する火山構造性地震のエネルギーと噴火により放出された噴出物量の関係をFig. 13に示す。地震エネルギーと噴出物量の間には正の相関がみられ、地震エネルギーからみた噴出物量の上限式を与えることができる。Merapi火山の過去の噴火の前駆地震エネルギーと噴出物量はほぼ上限式付近にある。上限式から求められる噴出物量を噴火ポテンシャル体積とし、この量の25%が火砕流となると仮定して、これに対応する火砕流の流下範囲のハザードマップをプレアナリシスデータベースから抽出したのがFig. 14である。前駆地震エネルギーは前駆活動が進行するにつれ増加するので、火砕流の流下範囲も拡大する。地震エネルギーから直接的に火砕流の流下範囲を予測できるわけではないが、前駆活動に応じて火砕流ハザードの評価を更新していくことが可能である。

SSDMのサーバはCVGHMの本所（バンドン）とその傘下でメラピ火山の監視に当たるBPPTKG（ジョグジャカルタ）に設置されている。関係する機関からサーバにアクセスすることにより、データ取得とシミュレーションの実施が可能である。さらに、科学技術振興機構の持続可能開発目標達成支援事業（aXis）では、ハザードマップのプレアナリシスデータベースを作成するSSDMに加え、火山観測データから噴火ポテンシャルを計算し、それに基づいて最適のハザードマップを抽出して定期的に更新するSSDM-LocalをGuntur火山とSemeru火山の観測所に設置して、火山の現場の職員がハザードを評価することができるようにした。

5. 将来発生が予測される桜島大規模噴火

5.1 始良カルデラ下におけるマグマ蓄積

桜島においては、1955年以降、南岳山頂において小規模爆発が繰り返されているが、桜島の過去の噴火活動を考えると最も懸念されるのは、1914年に発生した大正噴火のような大規模噴火（VEI4）である。桜島の26,000年の噴火の歴史においてこの規模の噴火は16回、これを超える規模の噴火（桜島薩摩）が1

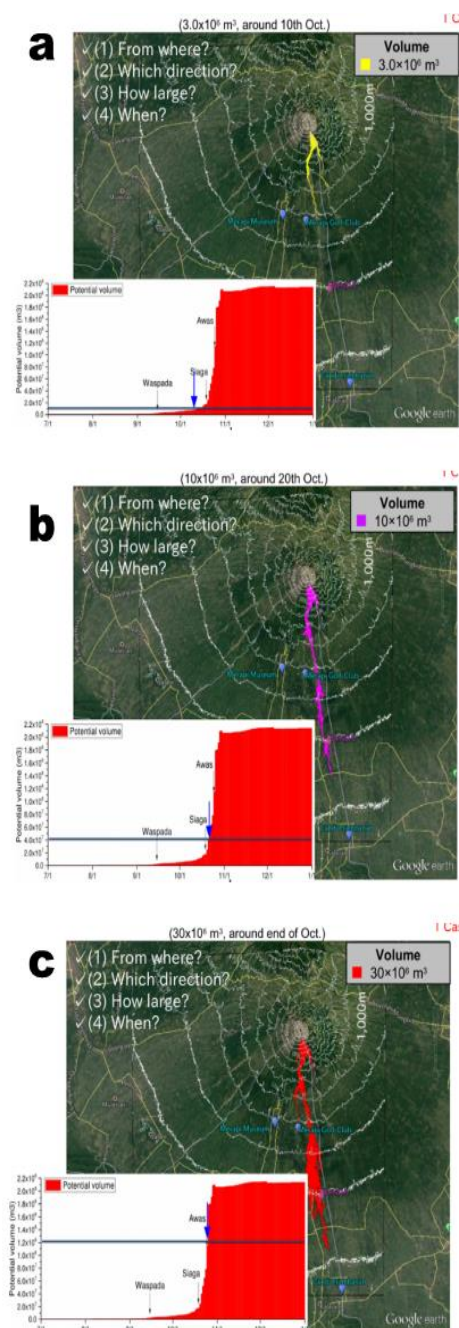


Fig. 14 Epicenter distribution of VT earthquakes at Guntur volcano, West Java, Indonesia. Crosses indicate seismic stations.

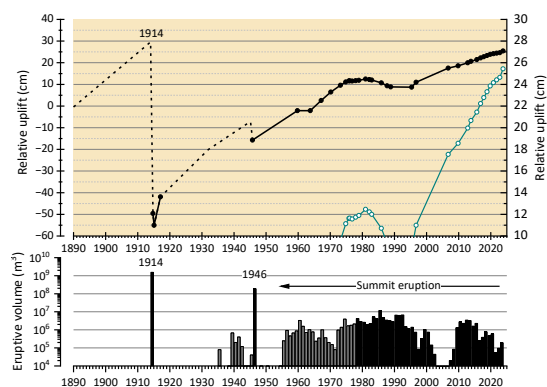


Fig. 15 Ground deformation of Aira caldera and eruptive activity at Sakurajima volcano. Top: Vertical ground deformation at BM.2474 referred to BM. 2469 (Kagoshima city). The green line is the black line magnified by a factor of 10. The scale is shown on the right axis. Bottom: Annual eruptive volume (DRE). Gray bars are estimation based on number of vulcanian eruptions.

回発生している（小林・他，2013）．最近550年は，文明（1471～1476年），安永（1779年～1782年），大正の3回の大規模噴火が発生しており，26,000年の噴火の歴史においても高いレベルにあるといえる．

大正噴火発生後には，南九州一円において地盤が沈降し，沈降の中心が鹿児島湾北部海域に対応する始良カルデラの中央部にあることから桜島のマグマ溜まりは始良カルデラ下の深さ10kmにあると推定されている（Omori, 1916; Mogi, 1958）．

南九州では1890年ごろから水準測量が行われ，地盤変動の推移が長期間にわたってとらえられている．BM2469を基準とするBM2474の上下変動に注目してみると，1890年ごろから大正噴火直前までには20cm隆起し，噴火後には，約80cm地盤が沈降したと推定されている（佐々，1956）．その後，1946年の昭和噴火や南岳第2活動期には地盤の沈降が見られるものの，110年かけて2023年までに地盤は73cm隆起した（Fig. 15）．始良カルデラの地盤の隆起の中心は先行研究と同様に始良カルデラの中央部にあり，微小球状圧力源（Mogi, 1958）を仮定した応力の中心の深さは10kmから12kmにある．始良カルデラの隆起はその地下に蓄積されるマグマの量の増加を意味し，大正噴火に伴う沈降量に匹敵する隆起量が観測されていることは，大正噴火級の大規模噴火を発生させるマグマの量が110年間に増加したと考えられる．

桜島において観測されている地盤変動からは，北岳下と5000年間噴火活動を繰り返している南岳下のマグマ溜まりが推定されている（Hotta et al., 2016）．大正噴火に伴って始良カルデラの地盤沈降が，逆に

桜島では地盤の隆起が観測されたこと（Omori, 1916）は，カルデラ下にあったマグマが噴出する必要はないが，桜島に向かって貫入したはずである．したがって，今後，起こりうる大規模噴火においても，始良カルデラに蓄積されたマグマは桜島に向かって必ず移動するはずである．そのことを念頭に桜島の北方始良カルデラから貫入するマグマを早期に検知するために，桜島北東部の高免に新たに観測坑道を2016年に建設した（Fig. 3）．桜島ではハルタ山（京都大学，1985年）と有村（国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所，2006年）に観測坑道が設置されているが，ハルタ山観測坑道は，南岳において発生する爆発の前駆膨張・隆起を検知するためのものであり（Kamo and Ishihara, 1989），有村観測坑道は小規模であるが頻発する昭和火口噴火において地盤変動検知力を発揮した（Iguchi et al., 2013）．高免観測坑道は南岳からの距離が遠くなるため，山頂噴火に伴う地盤変動の検知力は劣るが，北方からのマグマの貫入に対して早期検知が可能となるはずである．

5.2 噴火警報に基づく避難

気象庁は2007年12月から噴火警報を発表している（山里・他，2013）．噴火警報は，火山岩塊，火砕流，溶岩流，融雪泥流に対して警戒を要する範囲の広さを噴火警戒レベル（2～5）で表し，防災対応の指標とするものである．噴火が繰り返される桜島においては，通常，3（警戒を要する範囲が南岳と昭和火口から2km，入山規制）で噴火警戒レベルが運用され，火山活動に異常が見られる時は，居住地域の火山噴火の影響が及ぶとされるレベル4，5の特別警報が発表される．

桜島においてはレベル4，5の警報が過去に1回ずつ発表されている．レベル4の警報は2015年8月15日に発表された（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台，2015）．有感を含む火山構造性地震が頻発し，1000回以上に達した．また，地盤変動量も大きく，有村観測坑道のひずみ計直交成分では15 μ ストレインに達した．これは，標準的な山頂爆発に伴う地盤変動の約300倍の大きさである．気象庁は警戒を要する範囲を南岳及び昭和火口から3kmの範囲とするレベル4の警報（当時は避難準備，現在は高齢者等避難）を発表した．この場合，避難の対象となるのは，有村町，古里町の一部であるが，2008年から2017年までは昭和火口の噴火活動期（Fig. 1）であり，昭和火口において時々発生する火砕流は東へ流下していたので，筆者は，昭和火口の東麓に位置する黒神塩屋ケ元地区も火砕流の影響を受ける可能性があるとして同地区も避難の対象とするよう助言した．当時はレベル4における避難対応は避難準備情報でよかったが，鹿児島

島市は避難勧告を発令することとし、噴火警報が推奨する有村町、古里町に加え、黒神塩屋ケ元地区も避難対象に加えた。これら3地区から77名の住民が島内の指定避難所へ避難した。

レベル5に引き上げられたのは、2022年7月24日に爆発である。爆発現象は小規模であったが、気象庁は監視カメラの映像から火口からの距離2.4kmを超えて火山岩塊が飛散したとして、警戒を要する範囲を火口から3kmへ拡張するレベル5の警報を発表した（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台、2022）。2016年以降、順次公表されている噴火警戒レベルの判定基準に基づいた判断である。鹿児島市は有村町と古里町の一部に避難指示を発令し、36名（避難対象区域外5名を含む）の住民が島内の避難所へ避難した。この噴火への対応の課題はすでに井口（2023）において指摘したとおりであるが、最大の問題は気象庁のレベル5を知らせるエリアメールの発出が大規模噴火の発生を意味するものと誤解されたことにある。エリアメールにはレベル5しか記載されず、警戒を要する範囲が記載されなかったことが問題である。気象に関するレベルとは異なり、生命に直接かわる現象を対象とする噴火警報のレベルは警戒を要する範囲の広さを示すものであって、警戒を要する範囲に居ればレベル2でも5でも危険度は変わらないが、レベル5が最高の警戒度を示すものとして誤って認識されている。レベル5は噴火による重大な被害が居住地域に拡大することを意味するものであり、その居住地域は警戒を要する範囲で別途指摘されるものである。レベルそのものよりも警戒を要する範囲が防災情報として重要であることを示した噴火事例といえる。今後発生が予測される桜島の大規模噴火では、レベル5の警報は必然であり、避難の必要性を示すだけの5のレベルはもはや意味を持たず、避難の範囲を示す警戒を要する範囲が重要な意味を持つ。

5.3 観測データに基づくハザード評価

このように噴火に対して警戒を要する範囲の決定が重要であることは明白であるが、桜島の2022年7月24日噴火のように事後の対応であっても混乱している。したがって、噴火発生前の警戒を要する範囲の設定にはさらに大きな困難を伴う。活動火山対策の総合的な推進に関する基本的な指針（平成28年2月22日 内閣総理大臣決定）によれば、火山災害警戒地域における警戒避難体制の整備について指針となるべき事項として、火山防災協議会では、「噴火シナリオ」や「火山ハザードマップ」、「噴火警戒レベル」、「避難計画」等の一連の警戒避難体制について協議するものとされている。避難計画は火山噴火に対して噴火警報に示される警戒を要する範囲からの避難

について定めたものであり、警戒を要する範囲の決定はハザードマップがその基礎データとなる。ハザードマップは複数の噴火シナリオに沿って作成されているものなので、現在の火山活動がどの噴火シナリオに沿って進行しているかを評価できなければ、ハザードの評価ができない。それを可能にするのが火山観測データである。噴火警戒レベルは、噴火ハザードに基づき、警戒を要する範囲を明示したものであり、その根拠は火山観測データにある。一方、気象庁が公表している噴火警戒レベルの判定基準は、観測データに基づく判定であるが、過去の噴火に伴って観測されたデータの平常からの乖離と噴火による影響範囲の関係を記述したものである。ハザードマップの多くは、噴火シナリオに基づく、噴火ハザードの種類と規模に基づいて作成されており、噴火の様式と規模によってハザードマップは変わりうるものである。

桜島についていえば、山頂噴火の活発化と大規模山腹噴火のシナリオがある。山頂噴火では、火山岩塊と火山灰・レキの放出、場合によっては火砕流が発生する。大規模山腹噴火では、上記の噴出物に溶岩流が加わる。噴火警報が対象とする現象は火山岩塊、火砕流、溶岩流であるが、火山岩塊は最大でも3km付近まで到達するのが限界であり、現状の最大3.5kmの警戒範囲で十分と考えられる。溶岩流は、桜島における過去の噴火を見る限り溶岩流出から噴火が始まることはないこと、溶岩流の流下速度は事後対応で間に合うほどの速度しかないことから、噴火発生前の警戒範囲の設定に考慮する要因ではない。問題となるのは、火砕流を念頭に置いた警戒を要する範囲の設定であるが、火砕流の量を仮定すれば、現在のシミュレーション技術（例えば、宮本・他、1992、Itoh et al., 2000）で火砕流の流下範囲を予測することは可能である。必要なのは、観測データから火砕流として噴出する量を事前に推定できるかどうかである。少なくとも桜島においては地盤変動から貫入したマグマの量を推定可能である。火山性地震のモーメントとマグマ貫入体積の関係も明らかになっている（White and McCausland, 2019）し、インドネシアのMerapi火山の場合は、前駆火山性地震のエネルギーから経験的に総噴出物量を求める経験式が提示されている（Iguchi et al., 2019）。したがって、火砕流に変換されるマグマの割合を推定することが重要となってくる。噴出物量の総量に対する火砕流の割合が火砕流に変換されるマグマの割合を推定する指標となり、この割合がいわゆる噴火様式をより定量的に表現したものともいえる。例えば、溶岩ドームを形成して崩壊を起こす場合は、ほぼ全量が火砕流になると考えればよいし、1963年に発生したバ

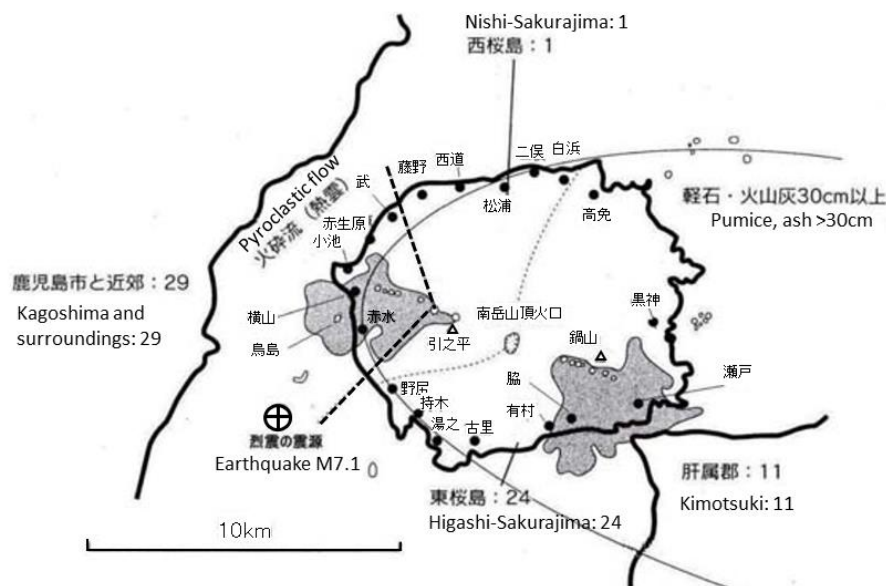


Fig. 16 Disaster due to the Taisho eruption in 1914. Grey area is covered by lava flow. Dashed lines indicate pyroclastic flow. Grey curve is pumice and ash fall with thickness >30 cm. Numerals represent number of casualties. Modified from Sakurajima Taisho Eruption 100th Anniversary Commemorative Book.

リ島Agung火山噴火の第2ステージのように40%を超える場合もある (Zen and Hadikusumo, 1964) . 最近の火砕流を伴った噴火では, Merapi火山の場合は25%程度 (Iguchi et al., 2019) , 口永良部島2015年噴火の場合は29%と評価できる (Geshi and Itoh, 2018) . 一方, 爆発的な噴火では火砕流の量は10%以下であり, 2014年に発生したKelud火山のプリニー式噴火では6%程度 (Maeno et al., 2019) , 桜島のブルカノ式噴火では火砕流が発生したとしても8% (2018年6月18日噴火の場合) である. Effusiveな噴火では火砕流の割合が多くなり, Explosiveな噴火では火砕流の割合が低下する傾向にある.

噴火様式については井口・他 (2019) に指摘するように, マグマの貫入速度と関係があり, マグマの貫入速度が大きいとExplosiveな噴火となり, 小さい場合はEffusiveな噴火となる. したがって, マグマの貫入速度が大きくなると火砕流の占める割合は, 低下するといえる. 一方, マグマの貫入速度が大きい場合は総噴出物量も増大するので, 火砕流の量が占める割合が低下しても絶対量は多く, ハザードが低下するわけではない. ここで問題としたい桜島の大規模噴火では, 大正噴火で桜島の西麓において火砕流が発生したことは知られているが (Fig. 16) , その量は見積もられていない. しかし, テフラ量が5億 m^3 であるので, 火砕流の量をその10%としても5千万 m^3 となり, 実際におきた海岸線まで到達する火砕流には十分すぎる量である. いずれにしても, 観測データをもとに貫入マグマの量と速度を評価することにより, 噴火の規模と様式を予測し, それぞれのハザー

ド要因ごとのハザードを評価することが必要である. 事後解析ではあるが, 2010年のMerapi火山噴火については, 地震観測データからマグマの量をポテンシャル体積として評価し, 火砕流への配分比を考慮することにより, 火砕流の流下範囲の拡大を予測して警戒を要する範囲の拡大に用いることの可能性を示した (Fig. 14) .

5.4 大規模噴火を想定した総合的防災研究の必要性

1つのハザード要因であっても発生する災害は複合的であり, 火山噴火のようにハザード要因が多様化している場合は, 災害は極めて複雑な様式をもって発現する. したがって, 火山災害発生リスク評価や災害対応はさらに複雑化することは避けられない. このような背景から, 観測データから噴火の様式と規模を予測し, 多様な噴火現象のエレメントごとにそのハザードを評価することによって噴火リスクを評価する一貫通貫型の研究を推進する火山防災連携研究ユニットを防災研究所は発足させた. ユニット自体は火山活動研究センターの火山防災研究センターへの改組によって廃止されたが, その研究コンセプトは変わるものではない.

大規模噴火では多量の噴出物が堆積するので発災から復旧・復興には想像以上に長い時間がかかると思われるので, ここでは復旧・復興に注目したい.

わが国で初めてのレベル5の噴火警報によって屋久島への島外避難を経験した口永良部島の場合, ①レベル5における警戒を要する範囲の縮小, ②インフ

ラ等の社会基盤の復旧、③一部地区の避難指示の解除、帰宅、④噴火警報のレベル3への引き下げによる全島帰宅を実現した。桜島大規模噴火でもほぼ同様のプロセスにより復旧・復興を目指すものと思われる。

レベル5における警戒を要する範囲の縮小には火山活動評価と噴火予知そのものの実力が試されているといつてよい。噴火活動が低下しつつある状況においても火山活動そのものとハザード評価によってその後の対策がすべて決定される。しかし、大規模噴火では桜島におけるほとんどの観測点が使用できなくなる可能性があり（観測施設の破壊、電力と通信の断絶）、観測体制の強化と観測インフラの早期復旧戦略を立てておく必要がある。観測網の早期立て直しにより初めて警戒を要する範囲の縮小が可能となる。

インフラ等の社会基盤の復旧においては、災害要因によって進め方が大きく異なる。大正噴火に伴う災害要因ごとの被災は、1) 溶岩流による埋没（横山、赤水、有村、脇、瀬戸）、2) 火砕流、噴石による集落の消失（桜島北西部の小池、赤生原、武、藤野、西道）、3) 厚さ0.3m以上の軽石・火山灰降下（それ以外の集落）に分けられる（Fig. 16）。溶岩流によって埋没した場合、復旧はほぼ不可能である。可能なのは溶岩流の上に新たに活動拠点を作ることだが、噴出時の溶岩は1000℃以上の高温であるため、冷却するだけでも相当長い時間を要する。この場合、移住することによって復興を目指すことになる。実際、大正噴火では13000人が島外へ移住した。火砕流、噴石によって集落が消失した場合は家屋がないので、仮設住宅に居住しながら、移住先もしくはもとの集落において再建を目指すことになる。いずれにしてもインフラ等の社会基盤の整備や住宅の建設に長期の時間を要する。厚さ30cm以上の軽石・火山灰が堆積した場合、比較的堆積量が少なければ、軽石・火山灰を除去し、インフラ等の社会基盤を整備することで復旧することが可能である。厚さが1mにも及ぶような場合、軽石・火山灰の除去は困難であり、除去せずにもとの集落において再建を目指すか、移住することになる。

道路および海上交通と、電気、通信、水道等の社会インフラの復旧なくして、居住地域の再建はできない。大規模噴火による地殻変動は大きく、港湾が使用不能となる可能性がある。島内の復旧には溶岩流が大きな障壁となる。桜島の各集落には避難港が整備されているので、改修した後、海上からの輸送が可能になるかもしれない。配電線を維持できるかどうかはやはり溶岩の流下に強く依存する。仮に大正噴火と同様に桜島口が溶岩に覆われるとすれば、桜

島への電力の供給は完全に断たれる。また、島内の配電線も溶岩流により寸断される。溶岩流は人命を失わせるほど早くはないが、復旧においては致命傷になる。通信、水道の復旧は、道路網の回復による資材運搬と電力の復旧が前提となる。

もう1つの重要な視点は火山災害を都市型災害として捉えることである。都市機能を支える交通、電気、通信、水道等の社会インフラの復旧を急ぐ必要がある。交通については道路網の復旧が最も急がなければならない課題である。南岳の噴火活動期であれば、路面清掃車（降灰対応型スーパードリル）により3日程度で鹿児島市街地において除去できていた火山灰だが、大規模噴火で最大1mの厚さの軽石、火山灰を除去する必要がある。バックホーなどの重機を稼働させる必要がある。早期の復旧を目指すには効率的な軽石・火山灰の除去が必要だが、そのためには降灰分布の早期の把握、降灰分布ごとに除去作業を行う道路の優先度を定める作戦シートの事前作成（場合によっては降灰除去順序の最適解（玉置・多々納, 2014）を得るためのシステム開発）、関係機関の間の基本方針の策定と調整、重機の確保を行う。さらに、除去した火山灰・軽石の処分場が問題である。わが国では除去した火山灰は産業廃棄物として取扱われるので海洋投棄は避けるべきである。また、2022年には小笠原諸島の福徳岡ノ場火山の大規模噴火で噴出した軽石の沖縄・奄美への漂着が問題となったばかりで、鹿児島湾を浮遊する軽石の処分も必ず顕在化するであろう。日常的に噴火する桜島南岳からの火山灰に対応する処分場では不足することは明白であり、処分場の確保も重要な課題である。鹿児島市街地のようなコンクリートで塗り固められた都市域へ堆積した軽石・火山灰はすべて除去する必要があるが、その対処は困難である。

このように、当面の避難だけでなく、復旧・復興までを見越した研究戦略が必要であるし、事前にそれを検討するためには、現在の火山活動に基づいた今後の噴火活動そのものとハザード予測、災害リスクの研究を総合的に進める必要がある。

6. おわりに

1981年6月に桜島火山観測所に助手として採用されたが、火山学の素養は全くない素人であった。まさにゼロからのスタートであったが、その後42年10か月にわたり研究を続けられたのは、多くの方々の支えがあったからである。桜島火山観測所の火山研究にお誘いいただいた加茂幸介先生には様々な面からご指導いただき、現在の自分があるのは加茂先生が存在なしにはあり得ない。また、当時、先輩の助手

であった石原和弘先生には多くのことを教わった。江頭庸夫氏、西潔氏からも観測についてご指導いただいた。火山観測を支えてくれたのは、観測所の技官であった園田忠惟氏、高山鐵朗氏、中村貞美氏であり、遠隔地施設における観測は技術職員の支援なしにはあり得ない。

当時の火山観測所自体は1講座相当の小規模な組織であり、全国の多くの火山研究者の連携によって火山観測と研究を進めることができた。中でも桜島において長年にわたり火山ガス調査を続けてこられた東京工業大学平林順一名誉教授からは多くのことを学ぶことができた。

火山観測所を維持し続けることができたのは、遠隔地施設における観測を重要視する防災研究所の教職員の皆さんのご支援の賜物である。さらに、火山観測から、噴火の発生予測とハザード予測、さらに火山災害リスク評価をシステムティックに進める研究の必要性に目を向けることができたのは防災研究所の存在があったからである。これらの研究要素のチェーンはSATREPSの研究の中で大きく進められたが、特に、筑波大学宮本邦明名誉教授から学ぶことが大きかった。また、火山災害リスクの多様性に対応できたのは工学研究科大西正光教授の存在が大きい。

インドネシアとの共同研究は火山観測網の設置から始まった事業をハザード評価まで高めた実践の場であった。加茂先生の時代から30年以上にわたって共同研究を続けてこられたのは、お互いの信頼関係があったからである。VSI-CVGHMの歴代の所長、特に、Wimpy Tjetjep 博士、Surono 博士、Muhamad Hendrasto氏に敬意を表したい。

42年10か月にわたる火山とその防災の研究をふりかえってみた時に、その研究要素のチェーンのなかで最も欠落しているのは、火山活動そのものの本質を見抜く研究である。噴火ハザードを評価するにあたって、その種類と範囲の多様性は噴火の規模と様式から予測されるものであるが、火山の活動原理の理解なしにはなしえない。例えば、噴火様式はマグマの岩石学的性質と含まれる揮発性成分によって決まるが、特に、変化が大きい揮発性成分が様式予測において重要である。観測データから揮発性成分の量を推測する研究（例えば、Iguchi et al., 2022）が必要である。火山活動そのものを理解する研究は依然として立ち遅れている。

参考文献

井口正人(2007): 空中赤外熱測定による口永良部島新岳周辺の地熱異常域変化の検出, 京都大学防災研究

所平成18年度特別事業報告書「口永良部島の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究」, pp. 45-50.

井口正人・石原和弘・高山鐵朗・グデ スアンティカ・ウィンピー チェチュップ・ラデン スクヒャール・イガン スタウィジャジャ・オニー スガンダ (1996) : インドネシア・グントール火山における地震活動, 京都大学防災研究所年報, 第39号B-1, pp. 161-171.

井口正人・為栗健・平林順一・中道治久 (2019) : マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, 第64巻, pp. 33-51.

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, 第130巻, pp. 755-770.

井口正人・山田大志 (2021) : 1955年以降の桜島南岳活動期の火山災害, 京都大学防災研究所年報, 第64号, pp. 57-72.

井口正人 (2023) : 桜島爆発による特別警報発表に関する考察, 京都大学防災研究所年報, 第66号A, pp. 95-104.

上田義浩・宇平幸一 (1988) : 気象台の火山情報業務について, 鹿児島国際火山会議論文集, pp. 216-218.

江頭庸夫 (1966) : 火山性地殻変動(II)—桜島火山の爆発に伴う異常傾斜変化について—, 京都大学防災研究所年報, 第9号, pp.83-98.

鹿児島県, 桜島降灰量観測結果 (H20~), <https://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/sakurajimakouhairyou2.html>.

鹿児島地方気象台・屋久島測候所 (1967) : 昭和41年11月22日の口永良部島新岳の爆発, 福岡管区気象台要報, 第22号, pp. 79-98.

加茂幸介 (1976) : 地震観測, 火山発電方式に関するフィジビリティ・スタディ, サンシャイン計画, pp. 28-59.

加茂幸介 (1977) : 地震観測, 火山発電方式に関するフィジビリティ・スタディ, サンシャイン計画, pp. 25-39.

加茂幸介 (1978) : 地震観測, 火山発電方式に関するフィジビリティ・スタディ, サンシャイン計画, pp. 17-31.

加茂幸介 (1978) : 桜島における噴火の前駆現象と予知, 火山, 第23巻, pp.53-64.

気象庁 (2013) : 薩摩硫黄島, 活火山総覧 第4版, pp. 1381-1398.

気象庁 (2015) : 口永良部島の火山活動解説資料 (平成27年3月), https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/15m03/509_15m03.pdf

- 京都大学防災研究所・東京工業大学工学部・鹿児島大学理学部(1981): 1980年(9月28日)の口永良部島新岳の噴火(概報), 火山噴火予知連絡会会報, 第20号, pp. 1-9.
- 小林哲夫(1982): 桜島火山の地質: これまでの研究成果と今後の課題, 火山, 第27巻, pp.277-292.
- 小林哲夫・味喜大介・佐々木 寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三(2013): 桜島火山地質図(第2版), 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 桜島大正噴火100周年記念誌(2014): 桜島大正噴火100周年事業実行委員会, p.163.
- 斎藤英二・井口正人・松島喜雄(2015): GPS連続観測による口永良部島火山の2014年噴火10年前からの地盤変動, 地質調査研究報告, 第66巻, pp.103-141.
- 佐々憲三(1956): 地震予知に関する2, 3の問題(Ⅱ)(地殻変動について), 京都大学防災研究所創立5周年記念論文集, pp. 3-7.
- 嶋野岳人・小室口剛博(2001): 諏訪之瀬島火山1813年噴火(文化噴火)の噴火様式とマグマの脱水過程, 火山, Vol. 46, pp. 53-70.
- 立尾有騎・井口正人(2009): 桜島におけるBL型地震群発活動に伴う地盤変動, 火山, 第54巻, pp.175-186.
- 田中館秀三(1935): 鹿児島県下硫黄島噴火概報, 火山, Vol. 2, pp. 188-209.
- 田中館秀三(1935): 口永良部島新岳噴火と火口の形態及び向江浜の山津波, 火山, 第2巻, pp. 339-354.
- 玉置 哲也・多々納 裕一(2014): 降下火山灰による道路機能障害評価とその復旧順序決定手法の提案, 自然災害科学, Vol. 33, 特別号, pp. 165-175.
- 為栗健・井口正人・八木原寛(2004): 諏訪之瀬島火山において2003年11月に発生した噴火地震の初動解析, 京都大学防災研究所年報, 第47号B, pp. 773-777.
- 中野嶽三(1932): 昭和6年の口永良部火山の噴火, 火山, 第1巻, pp. 69-72.
- 西 潔(1971): 桜島火山の火山性微小地震と爆発の研究(2)―火山性地震の震源分布―, 京都大学防災研究所年報, 第14号, pp.113-121.
- 西 潔・江頭庸夫・井口正人・高山鐵朗・園田忠惟・西村裕一・浜口博之・西村太志・沢田宗久・須藤靖明(1993): 諏訪之瀬島火山の地震活動―1989年10月―, 第2回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, pp. 3-11.
- 平沢晃一・松本幡郎(1983): 鹿児島県トカラ列島諏訪之瀬島の火山地質, 火山, Vol. 28, pp.101-115.
- 福岡管区气象台・鹿児島地方气象台(2015): 火山名桜島 噴火警報(居住地域) 平成27年8月15日10時15分.
- 福岡管区气象台・鹿児島地方气象台(2022): 火山名桜島 噴火警報(居住地域) 令和4年7月24日20時50分.
- 本間不二男(1934): 昭和8年12月～昭和9年1月, 口永良部島新岳の火山活動, 地球, 第21巻, pp. 243-266.
- 宮城磯治・伊藤順一・篠原宏志・鹿児島地方气象台(2010): 火山灰から見た2008年の桜島昭和火口の再活動過程, 火山, 第55巻, pp. 21-39.
- 宮本邦明・鈴木宏・山下伸太郎(1992): 火砕流の流動モデルと流下・堆積範囲の予測に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp. 211-216.
- 山里 平(1987): 桜島爆発地震の初動分布, 火山, 第32巻, pp. 289-300.
- 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, 第380号, pp. 9-15.
- Geshi, N., Itoh, J. (2018): Pyroclastic density currents associated with the 2015 phreatomagmatic eruption of the Kuchinoerabujima volcano, Earth Planets Space, Vol. 70, 119.
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T., Yamamoto, K. (2016): Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan - Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data -, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 310, pp. 12-25.
- Hotta, K., Iguchi, M. (2017): Ground deformation source model at Kuchinoerabu-jima volcano during 2006-2014 as revealed by campaign GPS observation, Earth, Planets and Space, Vol. 69, 173.
- Iguchi, M. (1991): Geophysical data collection using an interactive personal computer system (part 1) - Experimental monitoring at Suwanosejima volcano-, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 335-343.
- Iguchi, M. (1994): A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 39, pp. 49-67.
- Iguchi, M., Saito, E., Nishi, Y. and Tameguri, T. (2002): Evaluation of recent activity at Satsuma-Iwojima - Felt earthquake on June 8, 1996 -, Earth Planets Space, Vol. 54, pp. 187-195.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M., Hirabayashi, J. (2008): Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 178, pp. 1-9.
- 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, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 58, pp. 115-135.
- Iguchi, M., Nakamichi, H., Tameguri, T., Yamamoto, K., Mori, T., Ohminato, T., Saito, E. (2017): Contribution of monitoring data to decision making for evacuation from the 2014 and 2015 eruptions of Kuchinoerabujima Volcano, *Jour. Nat. Disast. Sci.*, Vol. 38, pp. 31-47.
- Iguchi, M., Nakamichi, H., Miyamoto, K., Shimomura, M., Nandaka, IGM, A., Budi-Santoso, A., Sulistiyani, Aisyah, N. (2019): Forecast of the pyroclastic volume by precursory seismicity of Merapi volcano, *Jour. Disast. Res.*, Vol. 14, pp. 51-60.
- 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. (1985): Dynamical analysis of volcanic explosion, *Jour. Geodyn.*, Vol. 3, pp. 327-349.
- Ishihara, K. (1990): Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan, *Magma Transport and Storage* (Ryan, M. P. ed), John Wiley & Sons, pp. 335-356.
- Itoh, H., Takahama, J., Takahashi, M., Miyamoto, K. (2000): Hazard estimation of possible pyroclastic flow disasters using numerical simulation related to the 1994 activity at Merapi Volcano, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 100, pp. 503-516.
- Kamo, K., Ishihara, K. (1989): A preliminary experiment on automated judgment of the stages of eruptive activity using tiltmeter records at Sakurajima, Japan, *Volcanic Hazards* (ed. Latter, J. H.), IAVCEI Proceedings in Volcanology 1, Springer-Verlag, pp. 585-598.
- Kanamori, H., Given, J. W. and Lay, T. (1984): Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980, *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, pp. 1856-1866.
- Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T., Shigeno, N. (2010) A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 189, pp. 158-171.
- Maeno, F., Nakada, S., Yoshimoto, M., Shimano, T., Hokanishi, N., Zaennudin, A., Iguchi, M. (2019): A sequence of a Plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on 13 February 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits, *Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 382, pp. 24-41.
- Minakami, T. (1970): Seismometrical studies of volcano Asama, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, Vol. 48, pp. 235-301.
- Minakami, T. (1974): Seismology of volcanoes in Japan, *Physical Volcanology*, Elsevier, pp. 1-27.
- Mogi, K. (1958): Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, Vol. 36, pp. 99-134.
- Mori, T., Morita, M., Iguchi, M., Fukuoka Regional Headquarters (2017): Sulfur dioxide flux monitoring using a regular service ferry after the 2014 eruption of Kuchinoerabujima Volcano, Japan, *Jour. Nat. Disast. Sci.*, Vol. 38, pp. 105-118.
- Nishi, K., Hendrasto, M., Rosadi, U., Purbawinata, M. A. (2007): Micro-tilt changes preceding summit explosions at Semeru Volcano, Indonesia, *Earth Planets Space*, Vol. 59, pp.151-156.
- Nishimura, T., Iguchi, M., Kawaguchi, R., Surono, Hendrasto, M. and Rosadi, U. (2012): Inflations prior to vulcanian eruptions and gas bursts detected by tilt observations at Semeru Volcano, Indonesia, *Bull. Volcanol.*, Vol. 74, pp. 903-911.
- Nogami, K., Iguchi, M., Ishihara, K., Hirabayashi, J. and Miki, D. (2006): Behavior of fluorine and chlorine in volcanic ash of Sakurajima volcano, Japan in the sequence of its eruptive activity, *Earth Planets Space*, Vol. 58, pp. 595-600.
- Omori, F. (1916): The Sakura-Jima eruptions and earthquakes, II, *Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm.*, Vol. 8, No. 6, 179p.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J-C, Borrero, C. A. (1990): Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 41, pp. 17-66.
- Sadikin, N., Iguchi, M., Hendrasto, M. and Suantika, G. (2007): Seismic activity of volcano-tectonic earthquakes at Guntur volcano, West Java, Indonesia during the period from 1991 to 2005, *Indonesian Journal of Physics*, Vol. 18, pp. 21-28.
- Smithsonian Institute, Global Volcanism Program, <https://volcano.si.edu/>
- Suantika, G., Suganda, O. K., Iguchi, M., Ishihara, K. (1997): Hypocentral Distribution and Focal Mechanism of Volcanic Earthquakes around Guntur Volcano, West Jawa, Indonesia, *Ann. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto*

- Univ., No. 40, IDNDR Special Issue, pp. 5-11.
- Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M. F., Budisantoso, A., Costa, F., Andreastuti, S., Prata, F., Schneider, D., Clarisse, L., Humaida, H., Sumarti, S., Bignami, C., Griswold, J., Carn, S., Oppenheimer, C., Lavigne, F. (2012): The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano — A '100-year' event, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 241-242, pp. 121-135.
- Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002): Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 47, pp. 197-215.
- Triastuty, H., Iguchi, M. Tameguri, T. (2009): Temporal change of characteristics of shallow volcano-tectonic earthquakes associated with increase in volcanic activity at Kuchinoerabujima Volcano, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 187, pp. 1-12.
- White, R., McCausland, W. (2016): Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 309, pp. 139-155.
- Yamamoto, K., Ohkura, T., Yokoo, A., Tameguri, T., Sonoda, T., Inoue, H. (2017): Vertical ground deformation related to the 2014 and 2015 eruptions at Kuchierabujima Volcano, Japan detected by repeated precise leveling surveys, *Jour. Nat. Disast. Sci.*, Vol. 38, pp. 133-144.
- Zen, M. T., Hadikusumo, D. (1964): Preliminary report on the 1963 eruption of Mt. Agung in Bali (Indonesia), *Bull. Volcanol.* Vol. 27, pp. 269-299.

(論文受理日 : 2024年8月31日)