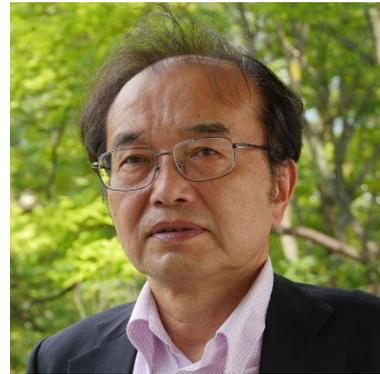


桜島から教えてもらったことー ブルカノ式噴火偏重研究からの脱却

井口 正人

1. はじめに

私が 1981 年に勤務を始めた防災研究所附属桜島火山観測所は、1960 年に火山噴火発生の実践的予知研究を目的として設立されたものである。設立の契機になったのは 1955 年に始まった桜島南岳の爆発活動であり、その活動は翌 1956 年にはさらに激しくなった。桜島では 1914 年に大正噴火と呼ばれる大規模噴火が発生していたため、活動の活発化に地元は非常に不安を覚えた。当時、理学部の教授であった故佐々憲三先生は、故吉川圭三先生（後に桜島火山観測所第 2 代所長）および故加茂幸介先生（後に第 3 代所長）と調査を行い、桜島の噴火活動は長期化するという見通しを立てた。鹿児島県を中心とする地元は国に対して恒常的観測施設の要望活動を行い、文部省は京都大学防災研究所に附属施設を設置することを決定した。京都大学が担当することになったのは、戦前より京都大学は理学部附属の阿蘇山の火山研究施設において観測研究を継続して九州に拠点を持っていたことによるが、学内において担当したのは 1951 年に新たに設置された新進気鋭の防災研究所であった。



設立当初から現在まで、災害を発生させる噴火はブルカノ式と呼ばれる爆発であり、主要な研究課題はブルカノ式噴火の発生を如何に予知するかであった。噴火活動の開始から 60 年以上が経過した 2024 年現在では爆発活動は低下傾向を示す一方で、桜島の主マグマたまりがあるとされる始良カルデラの地盤は着実に隆起と膨張を続け、大正噴火以降に蓄積されたマグマの量は大正噴火で噴出したマグマ量に匹敵する。大正噴火はプリニー式と呼ばれる大量の軽石を噴出する噴火に始まり、火砕流の発生を経て、溶岩流出に至った 20 世紀以降では我が国最大規模噴火である。したがって、このような噴火に対応するためには、これまでのブルカノ式噴火の研究成果に基礎を置きつつも、火山活動の基本原理に立ち返った新たな視点が求められる。

2. ブルカノ式噴火研究の重要性

2.1 主要な噴火様式としてのブルカノ式

桜島火山は 1955 年から南岳及びその東の昭和火口において噴火活動が続いている。代表的な噴火様式はブルカノ式噴火である。ブルカノ式噴火とは、数分間にマグマ物質を放出

し、マッシュルーム状の噴煙を形成する噴火であり、強い空気振動（爆発音）と火山岩塊の放出を伴う。桜島のブルカノ式噴火では噴煙は火口上 5000m 以上の高度に達することもある。また、空気振動は山腹において 1000Pa を超えることもある。京都大学防災研究所桜島火山観測所ではハルタ山（南岳山頂火口から 2.7km）において空気振動の振幅を 10Pa 以上の噴火を「爆発」として計数しているが、2023 年 12 月までに 15002 回の爆発が発生している。

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図 1 に示す。なお、火山灰放出量推定値は鹿児島県内 62 点（南岳から 50 km 以内）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 日の爆発では南岳山頂から 3.2 km 離れた古里温泉の海岸まで火山岩塊に達した。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、ブルカノ式噴火だけでなく、火山灰が連続的に放出される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、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。

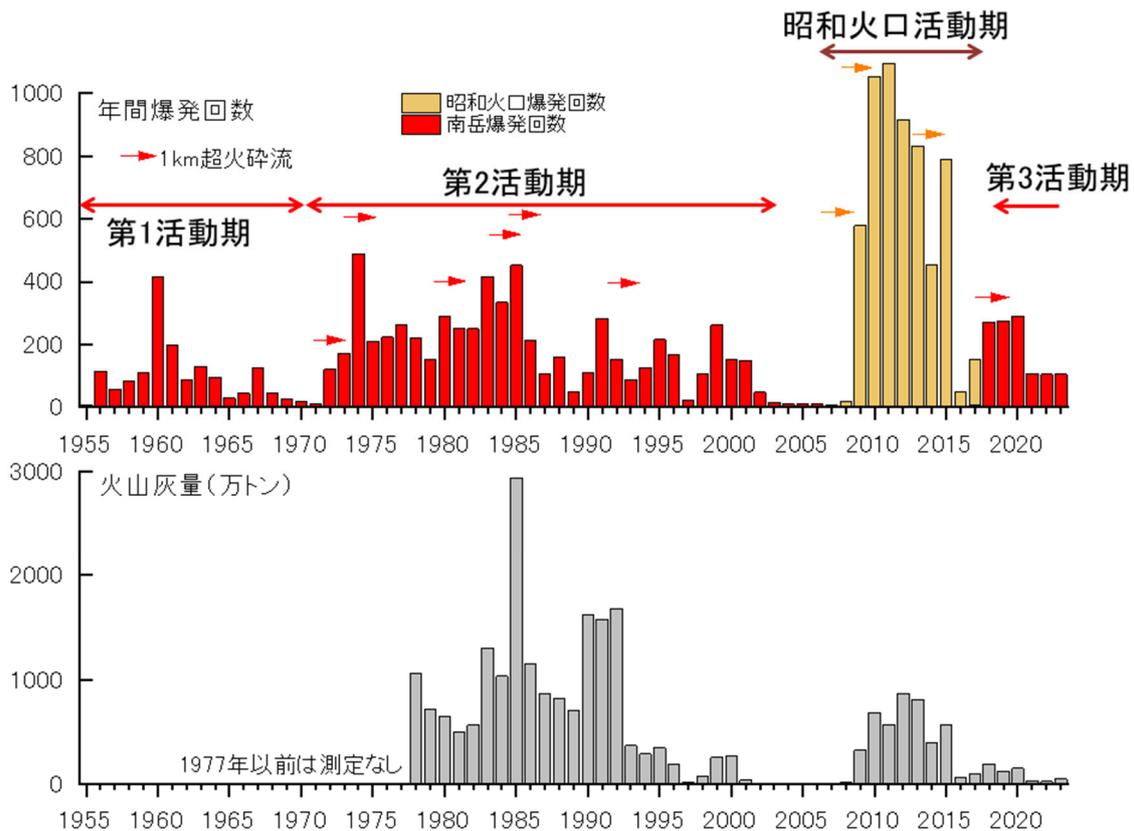


図1 桜島における年間の爆発回数と火山灰放出量推定値（1955年～2023年）

ところが、2017年10月30日から南岳に噴火活動の中心が回帰し、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。

図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以上は現地調査によって火山岩塊の落下が確認されている。距離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記述される合目に基づいて、合目の距離範囲における乱数（確率一定）で距離を与えた。気象庁は2007年12月以降、噴火警報を発表しているが、特別警報に相当するレベル5の警報の発表基準の1つに火山岩塊の2.4kmを超える飛散がある。2022年7月24日の爆発では、火山岩塊が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あったことが分かる。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の海岸まで達した。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。

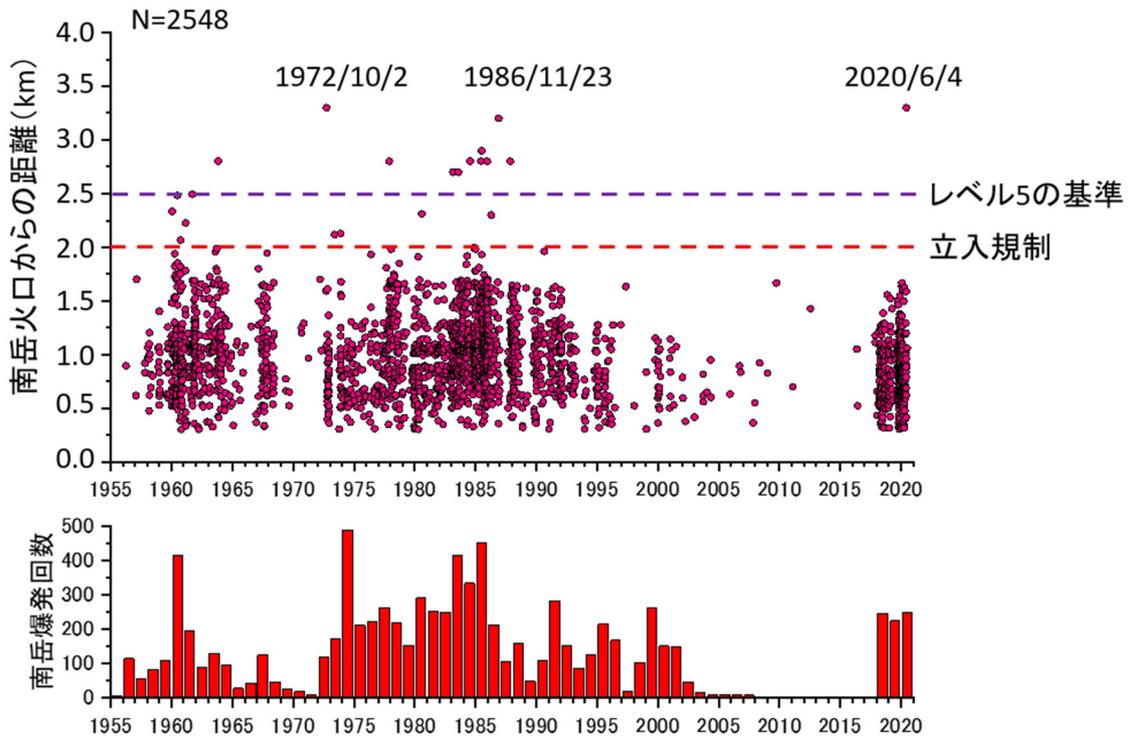


図2 南岳爆発に伴う火山岩塊の到達距離

一方、火山レキ、空気振動による被害には、家屋、建物の損傷が多い。図3にハルタ山（南岳火口から2.7 km北西）における南岳爆発による空気振動振幅の推移を示す。窓ガラスの破損などの被害があった事例（36回）を■で示した。被害は1984年と1985年に集中しており、この時期の空気振動の振幅が大きい。桜島火山観測所（袴腰）の窓ガラスも割れたことがある。概ね300Paを超えると窓ガラスの破損などの被害の可能性が高まるといえる。

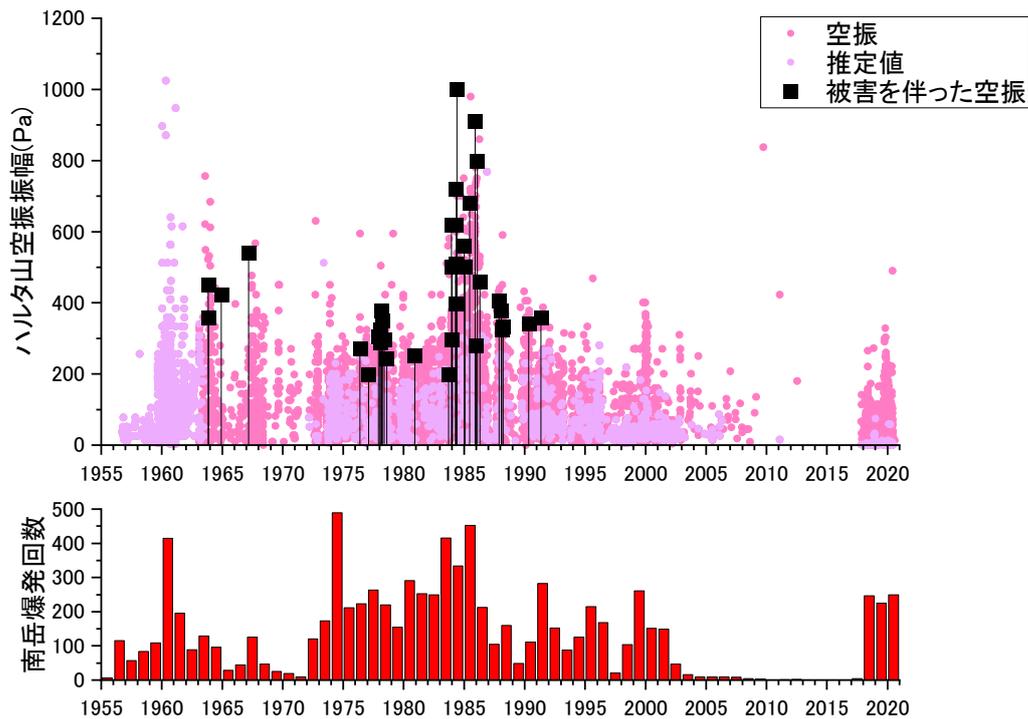


図3 南岳の爆発による空気振動振幅の推移。推定値は鹿児島地方気象台における空気振動振幅をハルタ山の距離相当に換算したものである。ハルタ山における空気振動観測は志田式微気圧計とアネロイド気圧計である。最近では低周波マイクロホンが用いられている。

2.3 ブルカノ式噴火に伴う現象の強さ—モニタリングの視点から

ブルカノ式噴火は爆発地震を伴う。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、爆発地震は最も振幅が大きく、初動も明瞭であることが多い。1970年代にはすでに震源位置が海面下0-2 kmに決められており、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。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当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。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。

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。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（掘削全長250m）である。ハルタ山観測坑道に設置した水管傾斜計と伸縮計（基線長28m）によりブルカノ式噴火に同期する南岳火口方向の沈降傾斜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沈降傾斜と収縮ひずみを検知することができた（Ishihara, 1990）。それまでは、B型地震の群発現象がブルカノ式噴火の前駆現象として捉えられており、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分活動に注意を促していた。当時、B型地震群発は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。

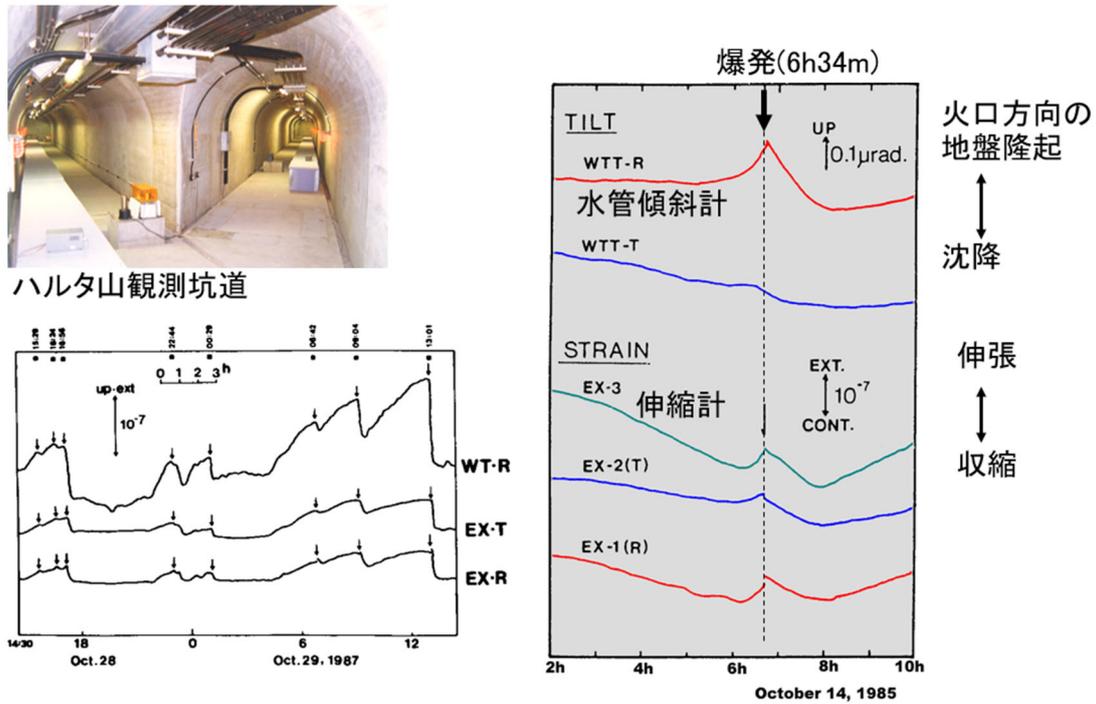


図4 ハルタ山観測坑道におけるブルカノ式噴火に前後する地盤変動 (Ishihara, 1990)

3. ブルカノ式噴火のメカニズムにみる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が、依然として謎であるのはなぜ爆発地震は等方膨張により始まるかであり、しかも空気振動との並行観測によれば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秒以上も早い時刻に等方膨張は発生しているかである。Kanamori et al. (1984) のモデルによれば、高圧な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。収縮はマグマの噴出過程であり、下向きのシングルフォースは粘性により瞬時に噴出できないマグマの表面における圧力を0にするための反作用と解釈されている。マグマの圧力が高まれば蓋は取れそうであるが、その前に発生する等方膨張はどのように解釈されるのであろうか。

そこで、ブルカノ式噴火発生直前の地盤変動を詳しく見てみる。図5に地盤変動の拡大図を示す。ブルカノ式噴火に伴う空気振動(爆発)は11時15分27秒に発生しているが、小規模な収縮はその約1分前の11時14分5~30秒頃に始まっている。すなわち、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・収縮に転じていることが分かる。これを爆発地震の開始を含めて時系列に沿ってまとめると、11時14分5~30秒頃に収縮開始、11時15分26

秒に爆発地震の等方膨張、11時15分27秒に蓋の破壊（空気振動発生）となる。このような小収縮→膨張→蓋の破壊という噴火発生まで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。

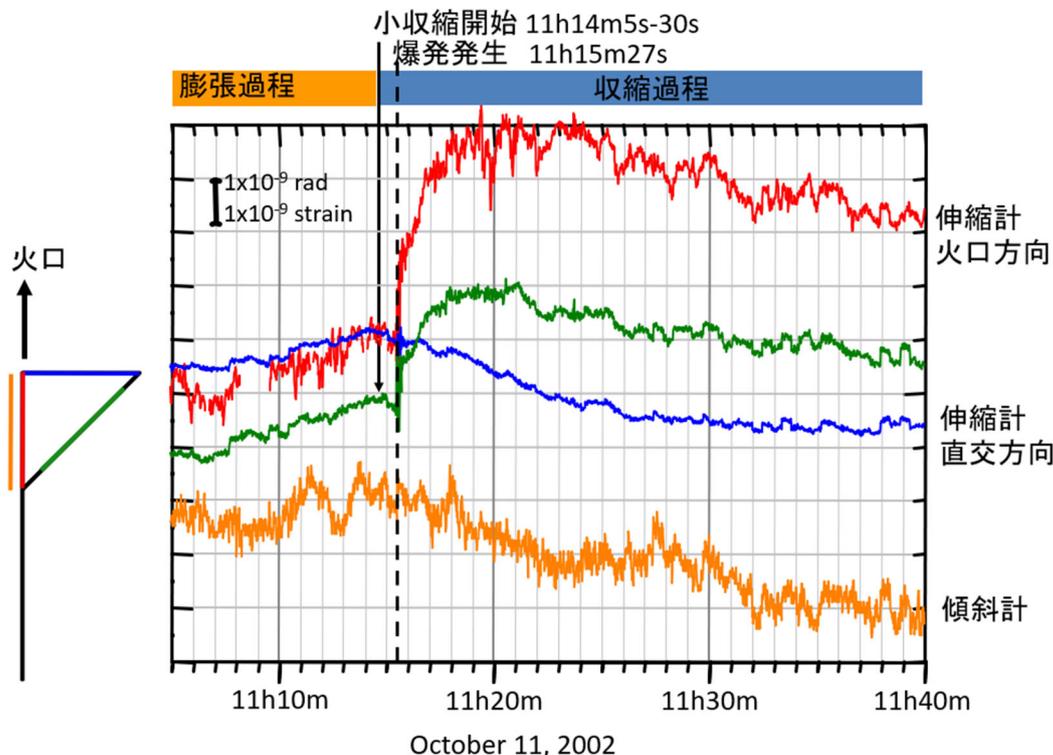


図5 ブルカノ式噴火に伴う地盤変動の拡大図。ブルカノ式噴火に伴う空気振動（爆発）は11時15分27秒に発生しているが、小規模な収縮はその約1分前の11時14分5～30秒に始まっている。

このような一連のプロセスは図6に示すモデルにより解釈される。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と考えられる（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観察されている。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、爆発地震初動を発生させ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。2の段階において圧力低下は始まるが、3と4の段階では一時的に圧力が増加する。5：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圧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）を含んだ高圧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と考えられる。

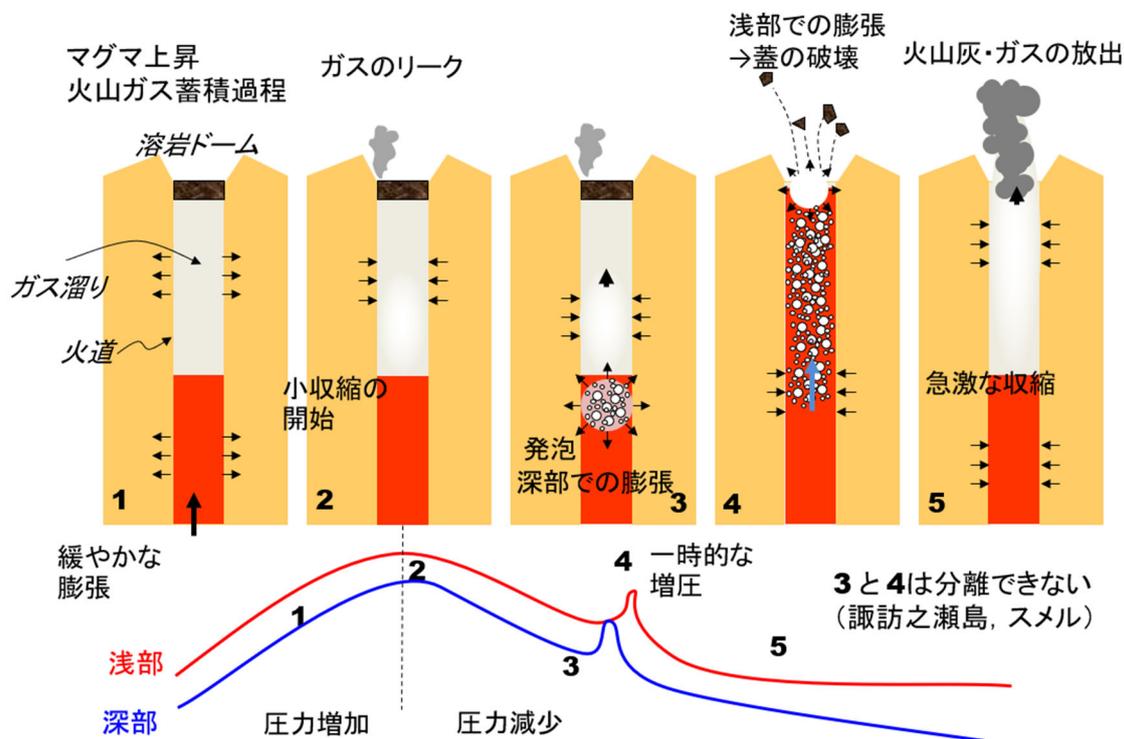


図6 ブルカノ式噴火を高圧マグマの減圧・発泡現象とするモデル化

4. 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しているが、火山噴火には揮発性成分がより強く関与するの発生様式がある。代表的な噴火様式に軽石を噴出するプリニー式噴火がある。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。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。貫入過程において脱ガスが顕著ではないと考えられるので、マグマの貫入速度が大きかったことを示唆する。噴火活動前の地震活動の激しさや地盤変動の大きさはそれを指示する。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。

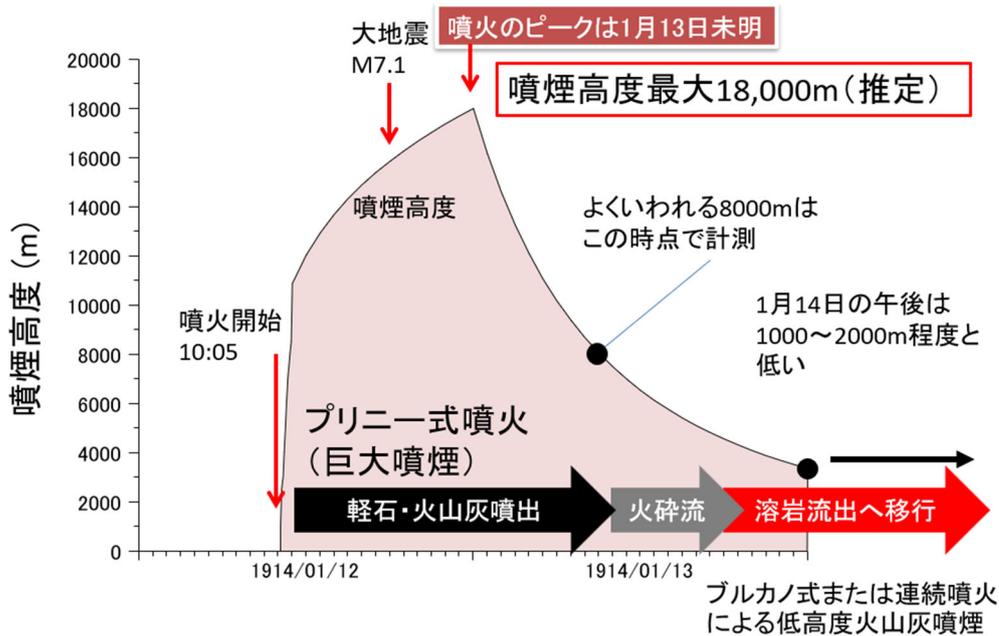


図7 1914年桜島大正噴火の推移。

桜島の南岳噴火活動期においてもブルカノ式噴火だけでなく、ストロンボリ式噴火や火山灰連続放出が発生している。少なくともブルカノ式噴火は図6の1に示すように溶岩ドームとガスたまりが分離していて脱ガスが進行している段階での現象と考えられる。水溶性火山灰付着成分の量を見てみると火山灰連続放出はブルカノ式噴火と同様であるが、ストロンボリ式噴火はブルカノ式噴火より明らかに塩素、フッ素とも多く(図7)ブルカノ式噴火と火山灰連続放出は脱ガス後の古いマグマを放出しているのに対し、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。

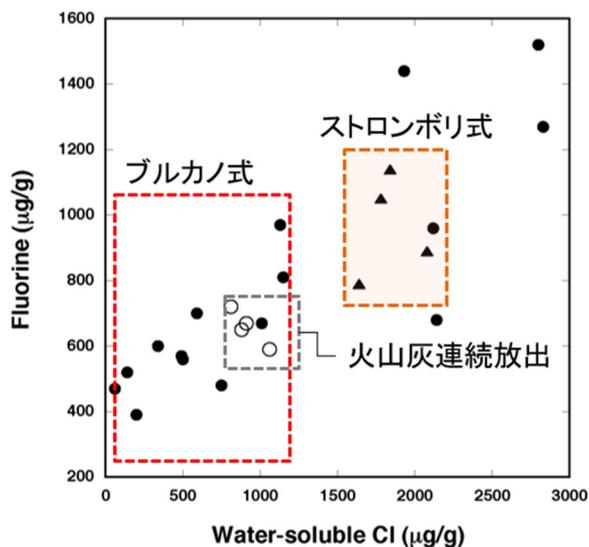


図7 噴火様式ごとの火山灰付着水溶性塩素とフッ素の量 (Nogami et al., 2006 に加筆)

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、B型地震の大半を占める）の群発を伴う。したがって、BL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への上昇過程から脱ガスマグマの噴出への過程とみることができる。詳細を図8に示す。1：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、2：噴火に伴い脱ガスとマグマの結晶化が進行する。3：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。Aマグマは脱ガス後のマグマに位置づけられる。この段階で新鮮なBマグマが火道内を貫入してくるとブルカノ式噴火に選考する地盤の膨張が観測される。この地盤変動の膨張源の深さは4 km付近と推定されているので、地盤の膨張はAマグマの変化ではなく、Bマグマの貫入を見ている。4：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。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。ストロンボリ式噴火後にブルカノ式噴火の発生回数が急増するのはこのためである。5-7：Aマグマがすべて排出されるとBマグマは火道内を上昇することができ、減圧により再びストロンボリ式噴火の活動へ移行する。B型地震群発は第1、2活動期において最も信頼のおけるブルカノ式噴火の前兆現象と考えられていたが、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図8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することは、脱ガスマグマが依然として存在し続けていたところに、Bマグマが貫入してきたことを示唆する。

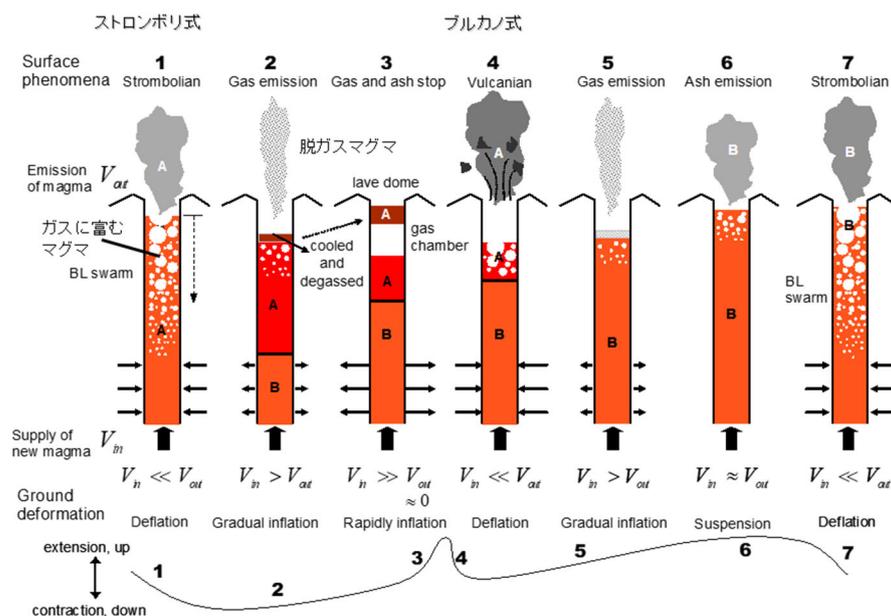


図8 ストロンボリ式噴火からブルカノ式噴火への推移。立尾・井口（2009）に加筆。

5. まとめ

- ① 1955年以降の桜島南岳活動はストロンボリ式噴火、ブルカノ式噴火、火山灰連続放出の3つの噴火様式で特徴づけられ、これらはストロンボリ式噴火→ブルカノ式噴火→火山灰連続放出の順に推移する。
- ② ブルカノ式噴火は短時間に高噴出率でマグマ物質を放出する。これらのマグマ物質は、火山岩塊、レキ、火山灰であり、南岳活動期における主要な火山災害の発生要因である。また、ブルカノ式噴火に伴う空振もしばしば被害を引き起こしてきた。
- ③ ブルカノ式噴火の解析から火山噴火は揮発性成分を含む高圧マグマの減圧発泡現象であることがわかるが、マグマからの脱ガスが進行して火山ガス溜まりと溶岩ドームが分離した状態で発生しており、その多くは脱ガスマグマを火山灰として排出している。
- ④ ストロンボリ式噴火は、より揮発性成分に富む新鮮なマグマの火口底までの上昇によって発生する。
- ⑤ 大規模噴火であるプリニー式噴火は揮発性成分を多量に含むマグマの速度の速い貫入により発生し、噴火に伴う発泡が顕著である。

以上のことから、火山噴火様式の多様性は揮発性成分の寄与が大きく、ブルカノ式噴火偏重研究には、火山活動全般を理解するのに限界がある。

文献

- 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*, 39, 49-67.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M. and Hirabayashi, J. (2008) Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 1-9.
- 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*, 64, 33-51.
- Ishihara, K. (1990) Pressure Sources and Induced Ground Deformation associated with Explosive Eruptions at an Andesitic Volcano: Sakurajima Volcano, Japan, In *Magma Transport and Storage* (Ed. M.P.Ryan), John Wiley and Sons, 335-356.
- Kanamori, H., Given, J.W., Lay, T., 1984. Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980. *J. Geophys. Res.* 89, 1856-1866.
- 西潔 (1970) 桜島火山の火山性微小地震と爆発の研究(1)―火山性微小地震の発生様式による爆発の分類及び溶岩上昇時の爆発について―, *京都大学防災研究所年報*, 第13号, 49-62.
- 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*, 58, 595-600.

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*, 47, 197-215.

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*, 53, 175-186.