

噴火の終わり方

佐藤博明^{*,**}・嶋野岳人^{***}・石橋秀巳^{****}

End of Eruption

Hiroaki SATO^{*,**}, Taketo SHIMANO^{***} and Hidemi ISHIBASHI^{****}

1. はじめに

噴火のトリガーについては幾つかの議論が行われてきた。例えば、Sparks *et al.* (1977) はマグマ溜まりへの新たなマグマの貫入が噴火のトリガーとなることを提案した。また、Blake (1984) や Tait *et al.* (1989) はマグマ溜まりの結晶作用の進行に伴うマグマの発泡・過剰圧の発生が周期的な噴火を生じる条件について検討を行っている。一方、噴火の終わり方については、東宮・小屋口 (1997) が噴出率変化曲線の取りまとめの中で触れているもの、その原因について殆ど検討は行われていない。著者等は、富士火山の宝永噴火のような爆発的噴火が急に停止するような例について簡単なモデルでどのような定性的な説明が可能かを考える中で、噴火の開始と同様、噴火の停止についてもいろいろな場合があることを認識し、それらの検討結果をまとめてみた。この小論は特に新しいデータやアイデアを提出するものではないが、噴火の停止についての考えを列挙し、議論の材料を提供する意図で書かれたものである。

2. 噴出率を左右するパラメーター

ここでは噴火としてマグマ噴火のみを取り上げ、水蒸気噴火などは除いて考える。噴火の原動力としては、マグマの浮力、マグマの発泡、マグマ溜まりへの構造的な応力等が考えられる(荒牧, 1975)。これらのうち、マグ

マ溜まりへの構造的な応力は、巨大地震後の火山噴火に見られるように、マグマ溜まりが臨界状態に置かれた場合には噴火の引き金になりうるが、一般に構造的な応力による歪は高々 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ であり、球形のマグマ溜まりに加わる構造的な応力だけが主因となって大きな噴火を引き起こすことは考えにくい。ただ、近年云われるように、シル状のマグマ溜まりのような場合は小さい歪みでも比較的大きな噴出量が可能となると思われる。一方、マグマの浮力とマグマの発泡は、マグマ溜まりの過剰圧(静水圧に対して過剰)として把握することができる。噴火の停止を定義すると、噴出率が有限の正の値から零になる、ということになる。そうすると噴火の停止については噴出率を変化させるパラメーター毎に異なる原因が考えられるであろう。噴出率を与える式は噴火様式によって異なるが、例えば、Mastin (2002)、小屋口 (2008) によると、主として次のようなパラメーターが影響する。

- マグマ溜まりの過剰圧
- マグマの粘性係数
- マグマ含水量
- 火道有効断面積

以下、この順に沿って主な既往研究について述べる。

(a) マグマ溜まりの過剰圧: 玄武岩質マグマの噴火の典型的な場合、Wadge (1981) は初期に噴出率が急激に増大

* 〒422-8529 静岡県駿河区大谷 836
静岡大学防災総合センター
Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 836 Ohya, Surugaku, Shizuoka 422-8529, Japan.

** 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
神戸大学理学研究科
Graduate School of Science, Kobe University, 1-1 Rokko-dai, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan.

*** 〒417-0801 静岡県富士市大淵 325
常葉大学大学院環境防災研究科

Graduate School of Environment and Disaster Research, Tokoha University, 325 Obuch, Fuji, Shizuoka 417-0801, Japan.

**** 〒422-8529 静岡県駿河区大谷 836
静岡大学理学部地球科学科
Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Ohya, Surugaku, Shizuoka 422-8529, Japan.

Corresponding author: Hiroaki Sato
e-mail: hsato47@gmail.com

し、最大値をとった後はほぼ指数関数的に減少することを指摘した。マグマの性質が一定の場合、火道が初期に開く段階で噴出率が急激に増大し、その後火道が安定すればマグマ溜まりの過剰圧（弾性エネルギー）の減少に伴って噴出率が指数関数的に減少し、過剰圧の解消に伴って噴火が終了することが考えられる。

(b) マグマの粘性係数: Poiseuille flow では噴出率はマグマの粘性係数に逆比例する。マグマの粘性係数はマグマ組成、温度、含水量、結晶量等によって10桁近く変動するので、噴火の終了に大きな影響を与えると予想される。Takeuchi (2011) は、マグマの噴火能力 (magma eruptibility) について、具体的な83噴火事例についてマグマの噴火前の粘性係数の検討を行った。その結果、多くの噴火ではマグマの粘性係数は $<10^6$ Pa s であり、これはマグマが噴火開始するために火道（岩脈）が地表まで伝搬するのに必要な流動性限界 (dike propagation limit) を示すと考えた。実際にはマグマが火道を上昇する途中で生じるマグマの脱ガス・結晶作用により粘性は桁で変化すると考えられる (e.g., Melnik and Sparks, 1999)。天然の火山噴出物の石基結晶度も巨大噴火での0%から溶岩スパインのようにほぼ100%に至る変動が認められるので、火道中での結晶作用がマグマ粘性へ及ぼす影響には噴火過程によって大きな変動が予想される。

(c) マグマ含水量: マグマ含水量について、Takeuchi (2011) は83噴火事例についてメルト含水量のデータをコンパイルしている。その結果を見ると、メルト含水量は温度と比較的良好な逆相関を示すが、メルト SiO₂ 量との相関は良くない。ただ、多くの珪長質噴火でメルト含水量は4-6wt%に集中している。Thomas and Neuberg (2014) は、ドーム噴火のような場合について、マグマの上昇速度を支配する要因を火道流モデルで検討したが、マグマ溜まり過剰圧や、火道直径も重要である一方、最も影響が大きいのがマグマ含水量であることを指摘している。過去には、マグマ溜まり内での含水量の分布に成層構造が生じる可能性が議論されたこともあった (Kennedy, 1955; 山崎, 1962) が、近年では一輪廻の噴出物でも元の含水量はほぼ同じである場合が多いことが指摘されている (Eichelberger *et al.*, 1986)。マグマ溜まり内でのメルト含水量の分布に関して、最近多くの火山で指摘されている火道内対流によるマグマ溜まりの脱ガス (Kazahaya *et al.*, 1994) が進行していると、浅所で脱ガスした低含水量・高結晶量のマグマがマグマ溜まり底部に沈殿して、その部分は噴火能力が低くなっている可能性が考えられる (Shinohara, 2008)。

(d) 火道有効断面積: マグマの上昇を円筒状火道中の Poiseuille 流で近似すると、マグマの流量は円筒半径の4

乗に比例するので、火道の有効半径は噴出率を左右する大きな要素である。マグマ溜まりの内壁に過剰圧が働くと、岩脈が形成される。岩脈は時間経過と共に破碎マグマによる壁の浸食や熱的に安定するために岩脈の一方所にマグマが集中して円形の断面を持つ火道が形成されていく (Ida, 1992)。Macedonio *et al.* (1994) は火道浸食過程についての検討を行い、比較的浅所での火道の拡大条件を示している。特に、噴火の停止と関連しては、火道壁の崩壊による塞栓の可能性が Vesuvius AD79年噴火を例として Dobran (1992), Papale and Dobran (1993) 等によって指摘されている。

以上、特に噴火様式に関係なく、噴出率=0となる条件についてまとめてきたが、以下では三つの噴火タイプ毎の噴火の終わり方について、より具体的にその要因を検討する。

3. 溶岩ドーム噴火の終わり方

溶岩ドーム噴火では、マグマは火道上昇中には基本的に発泡破碎することなく、ケイ酸塩溶融体を主とする連続流体の流れとして扱える。Stasiuk *et al.* (1993) は、溶岩ドーム噴火の質量流出率 (q : kg s^{-1}) を次のような式で表している。

$$q = \frac{\Psi}{\nu} \left\{ \frac{\Delta P - \rho_s g h_L}{h} + g(\rho_r - \rho_l) \right\}$$

ここで、 Ψ は火道形状ファクターで円筒状の火道の場合は $\pi R^4/8$ となる。 ν は動粘性係数 (粘性係数/密度)、 ΔP , ρ_s , g , h_L , h , ρ_r , ρ_l は其々、マグマ溜まりの過剰圧、溶岩の密度、重力加速度、火口上の溶岩の厚み、火道長さ、母岩密度、火道内マグマ密度、を表している。この中で主な変数としては、 ΔP , Ψ , ν , h_L , ρ_s が考えられる。実際の噴火の停止についても、これら5つのファクターが噴出率を支配すると考えられる。

マグマ溜まりの過剰圧がマグマ溜まりの弾性変形により、火道やマグマ物性等の条件が一定の場合、[(最終噴出量)-(任意時点の既噴出量)]/(最終噴出量)が噴出率と線形な関係を持つことが予想される (Stasiuk *et al.*, 1993, (21) 式)。実際のマグマシステムが他のパラメーターが一定であるとは限らないが、これらのパラメーターの線形関係から過剰圧の減少による噴出率の低下・噴火の停止を判断される場合があるかも知れない。

2つ目のファクターである火道有効径に関するファクターに関して、火道の閉塞には、火道壁の崩壊が生じる場合と、周囲からの冷却・固化により有効な火道半径が減少する可能性がある。溶岩ドーム噴火では火道内のマグマ圧はほぼ静岩圧に沿うか、浅所で過剰圧を持つと考

えられ (Massol and Jaupart, 1999), 火道壁の崩壊で火道が閉塞する場合はそれほど多くないと考えられる。一方, 地下水が豊富な地域 (例えば雲仙岳や周囲に海や湖が存在し淡水レンズが予想される火山島) では帯水層付近で火道が有効に冷却され火道径が縮小しやすい条件を備えている。

3つ目のファクターであるマグマの粘性については, 元々の組成・粘性が異なるマグマが火道に供給されて粘性が変化する場合と, 火道上昇中にマグマの脱ガス・結晶作用が進行してマグマ粘性が変化する場合が考えられる。Melnik and Sparks (1999) は火道中でのマグマの結晶作用がマグマ粘性へ非線形な影響を与えるため, サイクリックな噴出率の変動を生じる可能性を計算機実験で示した。雲仙岳 1991-1995 年噴出物の結晶度は, 噴出率の大きい時期に結晶度が低く (Nakada and Motomura, 1999), Melnik and Sparks (1999) のモデルと整合的である。この場合, 噴火末期の噴出率の低下した時期に最も結晶度が大きくなっており, 結晶度の増加による粘性増大が噴火停止の一要因であった可能性が考えられる。Melnik and Sparks (1999) では, マグマの脱ガスによる結晶作用には平衡からの遅れが考慮されているが, 実際に低温の流紋岩質マグマでは結晶作用の遅れが大きく, ほぼガラス質のままの比較的流動性の高い黒曜石溶岩として噴出流下する場合があると考えられる (Chaiten volcano 2008 年噴火, Pallister *et al.*, 2013; Cordon Caulle 2012 年噴火: Tuffen *et al.*, 2013)。つまり, マグマの脱ガスに伴う結晶作用による粘性率増加は単純には捉えられず, 条件によっては脱水に結晶作用が追従できず脱ガスしたメルトのみが噴出する場合がある。

4つ目のファクターである, 火道直上の溶岩ドームの荷重は, 実際の観測で評価可能である。例えば, 雲仙岳 1991-1995 年噴火では, 元々の火道口上に溶岩が約 250 m 積み重なった段階で噴火が停止した。溶岩の密度を 2200 kg/m^3 とすると, 5.5 MPa の荷重圧が火道上部に過剰にかかったことになる。噴火を生じるマグマ溜まりの過剰圧は 10-20 MPa 程度であると考えられる (例えば, Tait *et al.*, 1989) ので, この荷重圧は元々の噴火を起こした過剰圧の 25-50% に達する。日本の溶岩ドームでは守屋 (1983) によると比高 500 m 以上のものが数個あり, 特に大山の弥山ドームは比高 800 m に達し, その荷重圧は 18 MPa に相当する。この荷重圧に近い圧力を跳ね除けて溶岩ドームは成長を続けたので, このドーム噴火ではマグマ溜まりの過剰圧は通常よりも大きかったことが考えられる。大山や三瓶山 (比高 500 m) はアダカイトと呼ばれる性質の化学組成を有し, その起源は沈み込みフィリピンプレートの海洋地殻 (basalt + sediment:

Feineman *et al.*, 2013) の部分溶融で 50-70 km の深さで生じたと考えられ, 深部での浮力が原動力となってマグマが直接供給されたのかも知れない。

5つ目のファクターである, 火道中のマグマの密度に関して, Stasiuk *et al.* (1993) では発泡・脱ガスを考慮しない議論を行っているが, その後, 火道内マグマの発泡・脱ガスが扱われるようになり (例えば, Kozono and Koyaguchi, 2010; Melnik and Sparks, 1999), 発泡による密度低下が浮力を生じドーム噴火の原動力として有効であることが示されている。ただ, 非爆発的噴火の始まりでは, 火道を作りながらマグマが上昇すると, その先端では低圧のガス溜まりが形成されマグマの脱ガスが効率的で密度が十分下がらないことも考えられ (Lister and Kerr, 1991), 噴火初期には火道内マグマの発泡による浮力が不十分であることも考えられる。逆に言えば, いったん火道が確立され定常状態になるとその内部のマグマの発泡による浮力が噴火の原動力となることが考えられる (Kozono and Koyaguchi, 2010)。

雲仙岳 1991-1995 年噴火は, 最近の日本では珍しく溶岩ドーム噴火が継続したもので, 多くの地球物理学的, 地球化学的, 岩石学的, 地質学的観測研究が行われた。この噴火の噴出率の変動は毎日の溶岩ロープの観察記録に基づいて Nakada *et al.* (1999) によるものが得られ 1991 年と 1993 年にピークを持つ変化が示されている。Maeda (2000) は Ida (1996) による火道の変形モデルを発展させ, 一回のマグマ溜まりへの供給で, 弾性的なマグマ溜まりと粘弾性的な火道のモデルで実際に観察された 2 回の噴出率ピークを説明できることを示した。このモデルでは, 2 回の噴出率のピークが量的, 時間的にフィットされるようにパラメーターを決めているが, 結果的に石原 (1993) により観測されたマグマ溜まりの変形速度の変化を再現できている。ただ, 粘性係数は須藤他 (1993) の地表の流動から見積もった値を参考に含水マグマと比べ大きめの一定の値 (10^7 - 10^9 Pa s) を仮定しており, またマグマ溜まりの過剰圧の最大値は 2-6 MPa と小さい値が見積もられている。上記のように, 元の火口の上に最終的に 250 m の溶岩が累積しているため, 噴火期間の間に約 5.5 MPa の荷重が新たに生じたことを考えると Maeda (2000) のモデルでは溶岩ドームの荷重だけで噴火停止が生じることになる。実際には, 溶岩ドームの噴火では, 火道中でのマグマの発泡・脱ガス・結晶作用が生じて密度や粘性率は大幅に変化することが予想される。Noguchi *et al.* (2008) は, 雲仙岳 1991-1995 年噴出物の斜長石マイクロライトのサイズ分布, 核密度等を測定し, Toramaru *et al.* (2008) の減圧速度計を用いて, 深さ約 3 km でのマグマ上昇速度を求めた。地表での噴出

率との比較から、火道半径が深部ではより小さかったことを推定した。また、深部での火道半径が時間と共に変動したことを示唆し、Maeda (2000) や Ida (1996) の火道径変動モデルを支持した。Kozono and Koyaguchi (2012) は、溶岩ドーム噴火について脱ガス（縦方向・横方向）、結晶作用を組み込んだ次元の火道流モデルを提案し爆発的噴火への遷移条件を議論している。ただ、このモデルでは火道の変形は考慮されていない。Tanaka and Hashimoto (2013) は Kozono and Koyaguchi (2010) の溶岩ドームの定常流モデルを基に、新燃岳 2011 年噴火の火口溶岩の流出条件の検討を行っている。その結果では、マグマ溜まり圧に対して 2 つの火道流量の解が得られ、溶岩流出の停止は、マグマ溜まり圧が約 30 MPa 低下して噴出率が極端に下がり、その間に火道中マグマの脱ガスが進行してマグマ密度が増加することによって生じた可能性を示した。この減圧量からマグマ溜まりは約 7 km³ と見積もられた。ただ、この解析結果では火道半径は 16 m と、サブプリニー式噴火について Sato *et al.* (2013) が CONFLOW (Mastin, 2002) を用いて見積もった火道半径約 5 m と異なった結果になっている。これらの見積りの違いは、火道内におけるマグマの粘性係数の取り扱いの違いや、マグマ溜まりに岩盤圧 (Lithostatic pressure) 以上の過剰圧を考慮のかどうかにも依存しており、今後の検討が必要と思われる。

4. プリニー式噴火の終わり方

この小論を考える一つのきっかけとなったのは、一般にマグマ溜まりの過剰圧に強く依存した一輪廻の噴火様式の遷移が予想される一方、プリニー式噴火（サブプリニー式噴火を含む）が突然終わったり、断続的な活動することを定性的にどのように理解したら良いか、という問題意識であった。プリニー式噴火では、火道中のマグマの上昇速度や噴出率が大きく、マグマの初期含水量が高い必要がある（例えば、Jaupart and Allegre, 1991; Kozono *et al.*, 2013; Woods and Koyaguchi, 1994）。そうすると、2. で述べたように噴火が停止する要因として考えられるのは、火道の閉塞か、マグマ粘性の増大、あるいは含水量の低下である。プリニー式噴火について、火道の閉塞は主に火道壁の崩壊によると考えられる。Dobran (1992)、Papale and Dobran (1993) はヴェスヴィオ火山 A.D.79 年噴火を例に、粘性の大きなマグマの場合、火道内で気泡流から噴霧流に遷移する時に大きなマグマ圧の減少を伴い、遷移深度が増加した時に火道壁の崩壊が生じやすいことを指摘している。火道壁の崩壊が生じると、その閉塞が生じ、一時的にしろ噴火が停止することが考えられる。Costa *et al.* (2009) は円筒形より板状

の火道形状の方がマグマの発泡破碎深度が大きくなることを示し、その場合静岩圧と火道内の負の圧力差が大きくなり火道壁の崩壊が生じ易くなることを指摘している。また火道深部が板状の場合、負の圧力差が発生して母岩の弾性変形が起こり火道が閉じる可能性も指摘している。従来の火道流モデルでは、多くの場合火道形状については一定としていたが、実際には火道の形状・サイズが母岩の性質やマグマの過剰圧によって変化することが考えられ、そのような場合に火道流がどのような挙動を取るのかの検討が必要である。

有珠 1977 年のサブプリニー式噴火（新井田ほか, 1982）や、Mt.St.Helens の 1980 年の 5 回のプリニー式噴火は火道壁の崩壊を含む火道の閉塞で噴火が停止し、再度噴火を生じるという繰り返しが生じた可能性がある。実際には火道壁を作る物質の強度、発泡マグマの過剰圧、これらの火道に沿った深度プロファイルによって火道の閉塞状況は変化しうると考えられる。噴火推移予測の観点からみると、火道の閉塞は地下の状況が詳細には把握困難であり、プリニー式噴火の突然の終焉の予測は一般には容易ではないと思われる。Scandone and Malone (1985) は Mt. St. Helens 火山 1980 年の 5 ヶ月間の 5 回の間欠的なプリニー式噴火が、それぞれマグマ噴出率はほぼ一定ながら、供給率・継続時間は指数関数的に減少することを示した。同様の関係は 2011 年新燃岳での 3 回のサブ・プリニー式噴火についても Maeno *et al.* (2014) が指摘している。Scandone and Malone (1985) はマグマ放出の休止は、噴出率 ≧ 供給率となって火道内でのマグマ破碎面が深くなることにより生じるとしているが、その具体的な条件は述べられていない。Scandone *et al.* (2007) では ‘Magma quanta’ として間欠的なサブプリニー式噴火を議論しているが、具体的なモデルは示されていない。上に紹介した Costa *et al.* (2009) の母岩弾性変形による閉塞などの場合を含めマグマ溜まりや火道母岩が粘塑性を持つ場合のより具体的なモデルが必要と思われる。いずれにしても、プリニー式噴火が複数回繰り返す場合、徐々に各回の総噴出量は減少していき、いずれは終焉する。これはマグマ溜まりの過剰圧が小さくなる場合と、マグマ含水量が減少する効果、マグマの結晶作用による粘性の増加が影響する場合が考えられる。

新富士火山の 1707 年宝永噴火について、Miyaji *et al.* (2011) は小山 (2009) による噴火古記録と堆積物対比に基づき、一連の噴火を 6 回の休止を含む 17 のステージに区分しそれぞれの噴出率の推定を行った。その結果によると最末期に向けても噴出率は全体として殆ど変化しておらず、噴火の終焉が火道壁崩壊による火道の閉塞による可能性を述べている。この場合、マグマ溜まり圧は

下がっていないので、その後マグマシステムが変わっていなければ次の噴火規模がより大きくなる可能性が示唆された。富士火山のような玄武岩質マグマではマグマの粘性係数が元々小さいため、気泡流から噴霧流への遷移での火道内圧力の低下は大きくないことに注意する必要がある (Mastin, 2002; Papale and Dobran, 1993)。一方、宝永噴出物では玄武岩質発泡スコリアでもマイクロライトが 10-30 vol.% で変化し、また斜長石マイクロライトのアスペクト比が比較的高いのでマグマの粘性率が数倍程度変化することが考えられる (Ishibashi, 2009)。宝永噴火で噴出率が高く保持されたことが、マグマ溜まりの圧力が維持されたためか、時間と共に上昇マグマの粘性係数が減少したことによるものか、あるいはマグマ含水量の変化によるものか、詳細な岩石学的検討が望まれる。

5. カルデラ噴火の終わり方

カルデラ噴火では、一般に最初にプリニー式噴火が生じ、引き続き大規模火砕流とカルデラ陥没が平行して生じる場合が多い。日本では始良噴火、鬼界アカホヤ噴火、支笏カルデラ噴火等に共通である (Geshi *et al.*, 2014)。カルデラ噴火が大規模になる原因として考えられるのは、大規模マグマ溜まりが地殻中部に存在すること、最初のプリニー式噴火でマグマ溜まりが減圧し、上側の蓋の部分 (ピストン) が重力不安定になり沈下・崩壊すること、マグマの気泡流と噴霧流の遷移位置が火道を下がりマグマ溜まり上部に達すること、等の理由が考えられる。Tatsumi and Suzuki-Kamata (2014) は日本列島の火山噴火の規模-頻度関係が、2つのワイブル分布で説明できると指摘し、カルデラ巨大噴火 (噴火マグニチュード: $M > 7$) は複成火山の山頂噴火とは異なるメカニズムを持つことを示唆している。アナログ実験ではマグマ溜まりの減圧によって生じる環状割れ目は外側に傾斜しているので (Acocella, 2007; Komuro, 1987)、ピストン部分の沈下により火道有効断面積が大きくなりマグマの噴出率が大きくなる。また噴霧流はバルクの粘性が気泡流と比べ桁で小さいので粘性抵抗が無視できるようになり、同じマグマ溜まりの過剰圧、火道径でも噴出率は桁で大きくなる。これらの噴火の終焉は蓋のブロックがマグマ溜まりの底に達した場合 (Marti *et al.*, 2000)、あるいはマグマ溜まりの下部の噴火不能マグマ (non-eruptible magma; Takeuchi, 2011, 粘性が高く脱ガスしたマグマ) の層に達したりすることで生じると考えられる (Bachmann *et al.*, 2007)。この噴火の停止は主に噴火能力を持つマグマの欠乏によるものと理解できる。

以上のような単純なモデルは主にピストン型カルデラについて適用できるが、実際のカルデラはピストン部分

が多くブロックに分かれたピースミール型、片側だけが落ちたトラップドア型、ピストン部分の崩落が不完全なダウンサグ型、小規模なファンネル型等のような多様性があり (Lipman, 1997)、それらの場合には噴火停止がマグマ溜まりの噴火可能マグマの総排出で決まらない場合もありうると思われる。Acocella (2007) は、これらの多様性が、カルデラの発達段階で分類できることを議論し、発達段階はカルデラの直径 / 沈下量の比に対応することを示している。最も発達段階の進んだステージ 4 のカルデラでは直径 / 沈下量の比が 4-14 と小さくなる。もしこの比が、上記のように 1 回の噴火でほぼカルデラの噴出可能マグマが全て排出された結果生じたものならば、カルデラ下のマグマ溜まりは水平方向に拡がったシルのような形態を持っていた可能性が考えられる。実際、近年の大規模カルデラ下のマグマ溜まりとしては、シル状のものが考えられており、Cashman and Giordano (2014) はシル状のマグマ溜まりが上下に連結した複合マグマ溜まりが、地球物理学的観測、岩石学的証拠等をうまく説明できることを指摘している。Geshi *et al.* (2014) は、カルデラ噴火に先行するプリニー式噴火によるマグマ溜まり圧の減少がピストン状のカルデラブロックの沈降を引き起こすというモデルを用いて、カルデラ噴火発生の支配条件を検討している。このモデルではカルデラ噴火の規模が大きくなれば先行するプリニー式噴火の規模が相対的に小さくなるということがうまく説明されている。しかし、このモデルでは噴火規模が大きくなる程、マグマ溜まり体積に対する噴火総量の割合が小さくなっており、噴火停止についての上記のような Marti *et al.* (2000) のモデルとは異なる要因が必要となる。

6. まとめ

以上、検討したように、噴火の終わりには幾つかの要因が考えられるが、実際に噴火が終わった時点でその噴火の終了がどのような要因が働いて終了したものかの検討は従来それほど十分に行われていない。比較的詳しい観測がなされた 1991-1995 年雲仙岳噴火が 1995 年 1 月に停止した時、噴火停止の要因がマグマ溜まり圧の減少によるものか、火道上の溶岩ドームの荷重効果か、地下水による火道の冷却・縮小が効いたのか、溶岩の結晶度上昇に伴う粘性係数の上昇が有効であったのか、それらの定量的な評価はされていない。マグマ溜まりの過剰圧がかなり残っていれば、深部から新たな火道でのマグマ上昇も考えられるかもしれない。実際、1980-1986 年の Mt. St. Helens 火山の噴火は一旦停止したものの、2004 年に再度溶岩ドームの噴出が生じ (Scott *et al.*, 2008)、2014 年にも変動の兆しがあった。

Sparks (2003) は噴火予知について、マグマの上昇に関わる多くの過程が非線形であるため確率的な予測をとることが不可避であることを論じている。噴火の終了についても過程としては確率的な部分を含むであろうが、噴火が終息した段階で、噴火停止についてできるかぎり定量的なモデル化、パラメーターの評価を行うことは、火山学の実力を上げ、次の噴火予測にも有用であると思われる。

謝 辞

この原稿を書くきっかけは、静岡大学防災総合センターの防災フェロー修了研修指導で2013年1月に佐藤が常葉大学の嶋野研に滞在した折の議論であった。機会を作って下さった増田俊明防災総合センター長をはじめとするスタッフの方々に御礼申し上げます。原稿は小園誠史氏ともう一名の編集委員の方、橋本武志編集委員長との誤りの指摘やコメントにより改善された。記して感謝致します。

引用文献

- Acocella, V. (2007) Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas. *Earth Science Reviews*, **85**, 125–160.
- 荒牧重雄 (1975) 噴火現象の分類とメカニズム。火山, 第二集, **20**, 205–221.
- Bachmann, O., Miller, C. F. and de Silva, S. L. (2007) The volcano-plutonic connection as a stage for understanding crustal magmatism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 1–23.
- Blake, S. (1984) Volatile oversaturation during the evolution of silicic magma chambers as an eruption trigger. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8237–8244.
- Cashman, K. V. and Giordano, G. (2014) Calderas and magma reservoirs. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **288**, 28–45.
- Costa, A., Sparks, R. S. J., Macedonio, G. and Melnik, O. (2009) Effects of wall-rock elasticity on magma flow in dykes during explosive eruptions. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **288**, 455–462, doi: 10.1016/j.epsl.2009.10.006.
- Dobran, F. (1992) Nonequilibrium flow in volcanic conduits and application to the eruptions of Mt. St. Helens on May 18, 1980, and Vesuvius in AD 79. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **49**, 285–311.
- Eichelberger, J. C., Carrigan, C. R., Westrich, H. R. and Price, R. H. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, **323**, 598–602.
- Feineman, M., Moriguti, T., Yokoyama, T., Terui, S. and Nakamura, E. (2013) Sediment-enriched adakitic magmas from the Daisen volcanic field, Southwest Japan. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **14**, 3009–3031, doi: 10.1002/ggge-20176.
- Geshi, N., Ruch, J. and Acocella, V. (2014) Evaluating volumes for magma chambers and magma withdrawn for caldera collapse. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **396**, 107–115, doi: 10.1016/j.epsl.2014.03.059.
- Ida, Y. (1992) Width change of a planar magma path: implication for the evolution and style of volcanic eruptions. *Phys. Earth Plan. Int.*, **74**, 127–138.
- Ida, Y. (1996) Cyclic fluid effusion accompanied by pressure change: Implication for volcanic eruptions and tremor. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1457–1460.
- Ishibashi, H. (2009) Non-Newtonian behavior of plagioclase-bearing basaltic magma: subliquidus viscosity measurement of the 1707 basalt of Fuji volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **181**, 78–88.
- 石原和弘 (1993) 雲仙火山の溶岩の噴出率と地盤の変動速度から推定されるマグマの供給率について。京都大学防災研究所年報, **36 B-1**, 219–230.
- Jaupart, C. and Allegre, C. (1991) Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **102**, 413–429.
- Kazahaya, K., Shinohara, H. and Saito, G. (1994) Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit. *Bull. Volcanol.*, **56**, 207–216.
- Kennedy, G. C. (1955) Some aspects of the role of water in rock melts. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, **62**, 489–504.
- Komuro, H. (1987) Experiments on cauldron formation: A polygonal cauldron and ring fractures. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **31**, 139–149.
- 小屋口剛博 (2008) 火山現象のモデリング。東京大学出版会, 638 p.
- 小山真人 (2009) 富士山噴火とハザードマップ—宝永噴火の16日間。古今書院, 174 p.
- Kozono, T. and Koyaguchi, T. (2010) A simple formula for calculating porosity of magma in volcanic conduit during dome-forming eruptions. *Earth Planets Space*, **62**, 483–488.
- Kozono, T. and Koyaguchi, T. (2012) Effects of gas escape and crystallization on the complexity of conduit flow dynamics during lava dome eruptions. *J. Geophys. Res.*, **117**, B08204, doi: 10.1029/2012JB009343.
- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, J. (2013) Magma discharge variations during the 2011 eruption of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bull. Volcanol.*, **75**, doi: 10.1007/s00445-013-0695-4.
- Lipman, P. W. (1997) Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bull. Volcanol.*, **59**, 198–218.
- Lister, J. R. and Kerr, R. C. (1991) Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes. *J. Geophys. Res.*, **96**, 10049–10077, doi: 10.1029/91JB00600.
- Macedonio, G., Dobran, F. and Neri, A. (1994) Erosion processes in volcanic conduits and application to the AD 79 eruption of Vesuvius. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **121**, 137–152.
- Maeda, I. (2000) Nonlinear visco-elastic volcanic model and its application to the recent eruption of Mt. Unzen. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **95**, 35–47.
- Maeno, F., Nagai, M., Nakada, S., Burden R. E., Engwell, S., Suzuki, Y. and Kaneko, T. (2014) Constraining tephra dispersion and deposition from three subplinian explosions

- in 2011 at Shinmoedake volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.*, **76**: 823, doi:10.1007/s00445-014-0823-9.
- Marti, J., Folch, A., Neri, A. and Macedonio, G. (2000) Pressure evolution during explosive caldera-forming eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **175**, 275-287.
- Massol, H. and Jaupart, C. (1999) The generation of gas overpressure in volcanic eruptions. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **166**, 57-70.
- Mastin, L. G. (2002) Insights into volcanic conduit flow from an open-source numerical model. *Geochem. Geophys. Geosystems*, **3**, 7, 1-18, doi: 10.1029/2001GC000192.
- Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (1999) Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, **402**, 37-41.
- Miyaji, N., Kan'no, A., Kanamaru, T. and Mannen, K. (2011) High-resolution reconstruction of the Hoei eruption (AD 1707) of Fuji volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **207**, 113-129.
- 守屋以智雄 (1983) 日本の火山地形. 東京大学出版会, 135 p.
- Nakada, S. and Motomura, Y. (1999) Petrology of the 1991 1995 eruption at Unzen: effusion pulsation and groundmass crystallization. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 173-196.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1-22, doi: 10.1016/S0377-0273 (98) 00118-8.
- 新井田清信・鈴木建夫・勝井義雄 (1982) 有珠山 1977 年噴火の推移と降下火砕堆積物. *火山*, **27**, 97-118.
- Noguchi, S., Toramaru, A. and Nakada, S. (2008) Relation between microlite textures and discharge rate during the 1991-1995 eruptions at Unzen, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 141-155.
- Pallister, J. S., Diefenbach, A. K., Burton, W. C., Munoz, J., Griswold, J. P., Lara, L. E., Lowenstern, J. B. and Valenzuela, C. F. (2013) The Chaiten rhyolite lava dome: eruption sequence, lava dome volumes, rapid effusion rates and source of the rhyolite magma. *Andean Geology*, **40**, 277-294.
- Papale, P. and Dobran, F. (1993) Modeling of the ascent of magma during the plinian eruption of Vesuvius in AD 79. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**, 101-132.
- Sato, H., Suzuki-Kamata, K., Sato, E., Sano, K., Wada, K. and Imura, R. (2013) Viscosity of andesitic lava and its implications for possible drain-back processes in the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Japan. *Earth Planets Space*, **65**, 623-631.
- Scandone, R. and Malone, S. D. (1985) Magma supply, magma discharge and readjustment of the feeding system of Mount St. Helens during 1980. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **23**, 239-262.
- Scandone, R., Cashman, K. V. and Malone, S. D. (2007) Magma supply, magma ascent and the style of volcanic eruptions. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **253**, 513-529.
- Scott, W. E., Sherrod, D. R. and Gardner, C. A. (2008) Overview of the 2004 to 6, and continuing, eruption of Mount St. Helens, Washington. In Sherrod, D. R. *et al.* edit. 'A **Volcano rekindled: the renewed eruption of Mount St. Helens 2004-2006.**', *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **1750**, 3-22.
- Shinohara, H. (2008) Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity. *Rev. Geophys.*, **46**, RG4005, doi: 10.1029/2007RG000244.
- Sparks, R. S. J. (2003) Forecasting volcanic eruptions. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **210**, 1-15.
- Sparks, R. S. J., Sigurdsson, H. and Wilson, L. (1977) Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions. *Nature*, **267**, 315-318.
- Stasiuk, M. V., Jaupart, C. and Sparks, R. S. J. (1993) On the variations of flow rate in non-explosive lava eruption. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **114**, 505-516.
- 須藤 茂・坂口圭一・渡辺和明・斉藤英二・川辺禎久・風早康平・宝田晋治・曾屋龍典 (1993) 雲仙火山 1991 年溶岩の流動過程と粘性. *地質調査所月報*, **44**, 609-629.
- Tait, S., Jaupart, C. and Vergnolle, S. (1989) Pressure, gas content and eruption periodicity of a shallow, crystallizing magma chamber. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **92**, 107-123.
- Takeuchi, S. (2011) Preruptive magma viscosity: an important measure of magma eruptibility. *J. Geophys. Res.*, **116**, doi: 10.1029/2011JB008243.
- Tanaka, R. and Hashimoto, T. (2013) Transition in eruption style during the 2011 eruption of Shinmoedake, in the Kirishima volcanic group: Implications from a steady conduit flow model. *Earth Planets Space*, **65**, 645-655.
- Tatsumi, Y. and Suzuki-Kamata, K. (2014) Cause and risk of catastrophic eruptions in the Japanese Archipelago. *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, **90**, 347-352, doi: 10.2183/pjab.90.347.
- Thomas, M. E. and Neuberg, J. W. (2014) Understanding which parameters control shallow ascent of silicic effusive magma. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **15**, 4481-4506, doi: 10.1002/2014GC005529.
- 東宮昭彦・小屋口剛博 (1997) 噴火の多様性～噴出率の時間変動データのコンパイル. 津久井雅志編「南関東におけるフィリピン海プレートとその沈み込みに関係した玄武岩質火山の多様性とその変遷に関する研究」, 東京大学地震研究所共同利用研究集会報告書, 169-182.
- Toramaru, A., Noguchi, S., Oyoshihara, S. and Tsune, A. (2008) MND (microlite number density) water exsolution rate meter. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 156-167.
- Tuffen, H., James, M. R., Castro, J. M. and Schipper, C. I. (2013) Exceptional mobility of an advancing rhyolitic obsidian flow at Cordon Caulle volcano in Chile. *Nat. Commun.*, **4**, doi: 10.1038/ncomms3709.
- Wadge, G. (1981) The variation of magma discharge during basaltic eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **11**, 139-168.
- Woods, A. W. and Koyaguchi, T. (1994) Transition between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. *Nature*, **370**, 641-644.
- 山崎正男 (1959) 噴火に於ける水の役割. *火山*, 第 2 集, **3**, 95-106.