特集記事

火山噴火を中枢制御するマグマの発泡とガス輸送の実態*

吉村 俊平**

Magma Vesiculation and Gas Transport as a Controlling Process of Volcanic Eruption

Shumpei YOSHIMURA

1. 緒言

珪長質の火山噴火は様々なスタイルで起こる。軽石や火山灰を勢よく噴出することもある。穏やかに溶岩を流出することもある。1つの火山・1種類のマグマでも、はじめは爆発的に噴火したのち、溶岩を形成する噴火に移行することも珍しくない。なぜ、噴火の仕方に差異や変化が生じるのか。そもそも、何が噴火を引き起こしているのか。このような基本的な疑問に答えるには、マグマ中で発生するガスの振る舞いを詳しく理解することが欠かせない。なぜなら、ガスの発生こそが噴火の原動力であり、ガスの働き方の違いによって噴火の仕方が異なると考えられているためである¹⁾。火山物質科学の分野では、噴出物を様々な手法で解析したり、噴火を数式でモデル化したり、実験的にマグマを模擬することによって、噴火の仕組みを解明しようとしてきた。本稿では、こうして明らかにされてきたガスの働きと、今後の課題について考える。

2. マグマ中のガスの振る舞いと噴火様式

地殻の内部で作られる珪長質マグマには、数重量パーセントの揮発性成分 (H_2O , CO_2 , S, Cl など; 主成分は H_2O) が、ケイ酸塩メルトに分子レベルで溶解する形で含まれている。このようなマグマが上昇すると、圧力の低下によって揮発性成分の溶解度が低下するため、マグマは栓を開けた炭酸飲料のように発泡する (Fig. 1)。発泡したマグマは周囲岩石に比べ平均密度が低いいため、浮力が生じ、さらに上昇が加速される。マグマはやがて泡沫状となり、ある段階で気泡を含む液体の状態 (気泡流) から、気体の中にマグマの破片が浮いている状態 (噴霧流) へ変化する (破碎という)。そして、最終的に高温のガスと火砕物 (軽石・火山灰など) の混合ジェットとして火口から噴き出す。空高く立ち昇る噴煙柱や、高速で山体斜面を駆け下る火砕流は、このシナリ

Fig. 1 Vesiculation and fragmentation of magma as a fundamental process of explosive volcanic eruption. As magma ascends upwards and pressure decreases, water solubility in melt decreases, causing vesiculation. The gas fraction (vesicularity) of the magma monotonically increases with continuous ascent. The magma then fragments into mixture of high-temperature gas and discrete pieces of magma. The mixture ejects from volcanic crater as volcanic plume that upraises to troposphere or sometimes stratosphere, or causes a violent pyroclastic flow that flows downwards along the mountain slope.

オの最終結末である。火山噴火がしばしば災害をもたらすのは、このようなガスの挙動を考えれば、ごく自然なことといえるかもしれない。

しかし、一層不思議なのは、同じく揮発性成分に富むマグマなのに、爆発や破碎をせず、穏やかに溶岩を流出するような噴火が起こることである。たとえば、1991—1995年の雲仙普賢岳の溶岩ドームや、2011年に新燃岳火口に形成されたパンケーキ状の溶岩ドームなども、噴火前の含水量は高かった^{2,3)}。それなのに、マグ

* 原稿受付 2018年1月22日

** 北海道大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門
(〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目,
E-mail: shumpyos@sci.hokudai.ac.jp)

Fig. 2 Two mechanisms of the open-system gas loss of highly viscous silicic magma. One is the permeable gas flow through fracture networks that developed in the melt due to shear stress during magma ascent. Another mechanism is the permeable gas flow through interconnected bubble channels. Gas in bubbles escapes through the bubble network to the outside of the magma. As the gas pressure in the bubble channel decreases, the vesicular magma collapses into dense, bubble-less lava.

マは噴霧流ジェットとして爆発的に噴出するのではなく、低発泡度・低含水量の溶岩として穏やかに流出した。この一見矛盾した事態は、「開放系脱ガス」という現象を考えることによって説明されている⁴⁾。すなわち、マグマが上昇する際は必ず発泡するけれど、ある段階でガスだけが排気されることで、ガス量の少ない溶岩が作られるというものである。しかし、珪長質マグマの粘性係数は非常に高いので ($> 10^8$ Pa s)、個々の気泡が浮力で上昇することは期待できない。そこで、別のメカニズムとして、マグマの中で気泡同士が連結してガス排気通路を形成するという考え⁴⁾や、剪断応力によってマグマが脆性破壊され、破断面をガスが流れるといった考え^{5,6)}が提案された (Fig. 2)。そして、これらの考えの上に噴火モデルが構築され、噴火様式の変化や分岐の支配要因が議論されてきた。しかしながら、マグマ中のガスがどのようにして逃げているのか、具体的なことはほとんど理解されていない。なぜなら、火山噴出物にはガス排気通路の痕跡がほとんど残されていないためである。もし、何か適切な方法でガス排気通路を可視化することができれば、噴火の仕組みに関する理解は飛躍的に進むであろう。以下では、この課題に挑戦してきたいいくつかの研究を見ていく。

3. 肉眼観察による脱ガス通路の探索

開放系脱ガスは、火道の浅部で効果的に働くと考えられている⁴⁾。そこで、風化・浸蝕により剥き出しになっ

Fig. 3 A schematic illustration of the shallow part of volcanic conduit in Mule Creek, USA (Stasiuk et al. 1996). The outer part consists of glassy rhyolite, while the central part is composed of crystalline rhyolite. Tuffisite veins were ubiquitously observed in the rock. Spherulite, which is the product of devitrification of glassy rhyolite, was frequently produced at the glassy-crystalline boundary.

た火道の断面を詳細に観察し、ガス通路がどのように発達しているかを調べようとする研究が行われた⁷⁾。それによると、火道は Fig. 3 のように、半径方向に層構造をなしており、周縁部はガラス質の流紋岩、中心側では結晶度の高い流紋岩で構成されている。いずれの部分も低発泡度・低含水量である。この岩石を詳細に観察した結果、岩石中に多数の脈状の構造が形成されているのが見つかった。脈は、既存の岩石組織を切るように入っている。また脈の内部には細かな火山灰が詰まっており、流れ場に特有の堆積構造 (クロスラミナ) が形成されていた。このことから、この脈はマグマが脆性破壊することによって作られた破断面であり、火山灰粒子を含むガスがその部分を流れたと解釈された。火山灰粒子はマグマが破壊された際の破片であり、流れる途中でガスから堆積したというわけである。この脈は tuffisite vein と名付けられ、ガス排気通路の痕跡として知られるようになった。tuffisite vein は上下方向のほか、横方向にも伸びていることから (Fig. 3)、ガスは上方にも側方にも排気されたと考えられる。その後の研究により、tuffisite vein はさまざまな噴出物に普遍的に含まれていることが知られるようになり (Fig. 4)、現在では一般的な脱ガス通路として認識されつつある^{8,9)}。

4. 化学の眼で見た脱ガス通路

Tuffisite vein が本当にガスの通り道だったのか、どれくらい効率の良い脱ガス通路だったのかなどを、組織観察だけから評価するのは難しい。そこで、化学的手法を用いた研究が近年始まった。Berlo ら¹⁰⁾ は tuffisite vein と近傍の石基ガラスの微量元素組成を高空間分解能で分析した。その結果、vein 内部ではガスに溶解しやすい成分 (気相濃集元素) の濃度が大きく変動してい

Fig. 4 Tuffisite veins in volcanic rock. (a) Tuffisite veins in a glassy rhyolite from a dissected conduit in Iceland (Tuffen and Dingwell, 2005). (b) Tuffisite veins found in a volcanic bomb ejected from an explosive eruption in Chaiten volcano in 2008 (Castro et al. 2012). The grey part is the tuffisite vein, while the black part is glassy rhyolite (obsidian).

ることが明らかになった。例えば、Li 濃度が周囲の石基ガラスに比べ低下したり、Pb や Sb 濃度が増加していた (Fig. 5)。また、Li については vein へ向かって拡散で移動しているような分布も見出された (Fig. 5)。これらの結果は、メルト中の気相濃集元素がガスに吸収されたり、逆に減圧によってガスから沈殿したりしたことを示すと解釈されている。そして、このような気相濃集元素組成の改変は、tuffisite vein がガス通路であることを示す強力な証拠だと主張している。様々な気相濃集元素について、濃集・枯渇の程度を詳しく調べることができれば、ガス組成や流量、析出深度、継続時間などに

Fig. 5 Trace element profiles across tuffisite veins from Chaiten volcano (Berlo et al., 2013). Li is depleted in the vein, while enriched in surrounding groundmass glass and a large particle in the vein. Diffusion calculation for Li (not shown) indicates that the timescale was a few tens minutes. Sb and Pb are enriched in the vein, indicating that these elements precipitated due to changes in physicochemical conditions of the gas.

定量的な制約を与えることができるであろう。

また、マグマ中の破断面はガスを流すだけでなく、激しくスリップ運動を起こし、摩擦によって再加熱していることを示した研究例もある¹¹⁾。それによると、スフリエルヒルズ火山の安山岩噴出物の中に暗色の帯状構造が見いだされており、その部分では気相濃集元素（特に Cu, Au, Ag, Pb, Zn など）の濃度が高まっていた。これは、先の tuffisite vein の分析結果¹⁰⁾と似ている。また、暗色領域では斜長石斑晶がしばしば破壊されていたり、著しく部分溶融していることも見出された。これらのことから、この暗色領域は tuffisite vein に相当するものであり、ガス通路として機能するとともに、破断面自体

が断層運動を起こし、マグマを局所的に再加熱させる現象でもあったと解釈している。さらに、加熱によってメルト粘性が低下するため、破断面は閉塞しやすくなり、ガス通路としての機能が低下する可能性があることも提案している。以上より、破断面を介したガス流れは、ある決まった隙間を定常的にガスが流れるというより、温度や固着状態が時々刻々と変化する環境をガスが流れるという、ダイナミックな現象と考えられる。ガス通路としての機能を評価する際は、破断面の物理化学条件が大きく変動すること、それによってガス流れの効率にフィードバックが与えられる可能性があることも考慮する必要があるだろう。

5. 気泡連結通路の探索

以上の研究により、マグマ破断面は脱ガス通路として一定の役割を果たしていることが明らかにされてきた。しかし、マグマ中に破断面が形成される間隔（数 mm～数 m）は、気泡サイズ（直径 < 1 mm）に比べあまりに広すぎるため、マグマ全体からガスを抜き出すには力不足との考えもある⁸⁾。すなわち、破断面から遠い気泡は、無傷のまま残る可能性が高い。そのため、破断面のような局所的な通路とは別に、マグマ全体からくまなくガスを抜き取ることができるような通路が必要である。その有力候補は気泡連結通路（Fig. 2）であろう。軽石や高発泡度の溶岩は有限のガス浸透率の値を持っており¹⁾、3次元的に連結した気泡通路が発達していると考えられる。しかし、この通路が最も有効に働き、その結果、生成されたと考えられる緻密な溶岩については、既に浸透率は失われているため、かつて発泡や開放系脱ガスを経験したかどうかを知るのは難しい。例えば、気泡をほとんど含まないガラス質溶岩である黒曜石は、開放系脱ガスが最も効率よく働いた産物と考えられているが、化学組成にも組織にも目立った不均質は認められず、ガス排気通路の痕跡と思しきものは見出されていない。一体どのような仕組みで、高発泡度のマグマが緻密なガラス塊に変貌を遂げたのかという問題は未解決である。

現在、著者らは気泡連結通路の痕跡を可視化するべく、揮発性成分の濃度マッピングに取り組んでいる。これは、通路の痕跡が揮発性成分の不均一空間分布として可視化できるのではないかという考えに基づいている。この考えは、著者らが以前行っていたガス通路の消滅実験¹²⁾より得られた。この実験では、Fig. 6 のように、2本の流紋岩質の含水ガラス円柱を接触させながら 900℃ で様々な時間加熱した。加熱すると円柱表面は脱水するため、試料表面に向かって H₂O 濃度が低下する拡散プロファイルがガラス中に作られる。接触面でも同様に脱水が起こるので、ここを境に左右対称の V 字型の H₂O 濃度プロファイルが発達する。ところが、接触部は徐々に焼結し、2本の円柱はやがて一体化する。その結果、かつての接触部分はもはや脱水の場ではないため、V 字型の

濃度プロファイルは徐々に均質化し、U 字型を経て平坦な形状に戻ってゆく。したがって、かつての界面（＝脱ガス通路）が消滅しても、H₂O の濃度分布を調べれば、しばらくの間は界面位置を特定できる可能性がある。実験を行った結果、ガラスの接触部分は 4～5 時間で完全に焼結し一体化した。接触部分には目立った不均質や、脱ガス通路を示すような痕跡はほとんど残っていなかったが、H₂O 濃度はこの部分だけ低いことが確認された（Fig. 6）。このことから、一見均質な天然の溶岩についても、石基ガラス中の揮発性成分の濃度分布を面的に調べれば、かつてのガス通路を可視化できると考えられる。

Fig. 6 Outline of welding experiments for hydrous rhyolitic glass (Yoshimura and Nakamura, 2010). Two glass cores were juxtaposed and annealed at 900°C for 4 to 23 hours. Upon heating, water in the glass diffuses to the surface. The contact interface of two glass cores gradually welded into coherent melt.

Fig. 7 (a) A backscattered electron image of a rhyolitic lava sample from Niiijima island. (b) A chlorine-content map of groundmass glass. Low-Cl bands may represent the remnant of degassing pathways.

ただし、 H_2O の拡散は速いため、ほとんどの火山ガラスで含水量はすでに均質化している。そこで、 H_2O と同じ挙動を示すが、はるかに拡散の遅い塩素の空間分布を調べることを現在試みている。Fig. 7 は溶岩の反射電子像と塩素マップである。反射電子像では均質に見えても、塩素の空間分布を詳しく調べると、低濃度の帯状領域が存在するのが認識できる。これは、上記のように、かつての脱ガス通路の名残が見えているものと考えられる。すなわち、帯状の部分はかつて気泡の界面だった部分であり、当時は塩素（およびその他の揮発性成分）が気泡に向かい拡散していた。やがてガスが系外に失われ、ガス圧が周囲圧力より低がると圧密し、最終的に界面が焼結したものと考えられる。この“塩素メガネ”は、従来の手法では見えなかったガス輸送の仕組みを明らかにしてくれる、新しいひみつ道具である。今後はこれを駆使することで、火山噴火の制御機構を詳しく知ることができると思われる。

謝 辞

本稿執筆の機会は東大地震研の市原美恵博士よりいただきました。市原博士には日頃より著者の研究に興味を持っていただき、温かい励ましと助言をくださり、心か

ら感謝を申し上げます。海洋研究開発機構の桑野修博士には有益なコメントを頂きました。本研究の一部はJSPS 科研費 17K14376 の助成を受け行われました。

参 考 文 献

- 1) Gonnermann, H.M., Manga, M. : The fluid mechanics inside a volcano. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 39 (2007), pp.321-356.
- 2) Sato, H., Nakada, S., Fujii, T., Nakamura, M., Suzuki-Kamata, K. : Groundmass pargasite in the 1991-1995 dacite of Unzen volcano: phase stability experiments and volcanological implications. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 89 (1999), pp.197-212.
- 3) Suzuki, Y., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Nakada, S., Fujii, T. : Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan-Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 257 (2013), pp.184-204.
- 4) Eichelberger, J.C., Carrigan, C.R., Westrich, H.R., Price, R.H. : Non-explosive silicic volcanism. *nature* 323, Vol.16. (1986), pp.598-602.
- 5) Gonnermann, H.M., Manga, M. : Explosive volcanism may not be an inevitable consequence of magma fragmentation. *Nature* 426, Vol.27 (2003), pp.432-435.
- 6) Tuffen, H., Dingwell, D.B., Pinkerton, H. : Repeated fracture and healing of silicic magma generate flow banding and earthquakes? *Geology*, Vol.31 (2003), pp.1089-1092.
- 7) Stasiuk, M.V., Barclay, J., Carroll, M.T., Jaupart, C., Ratte, J.C., Sparks, R.S.J., Tait, S.R. : Degassing during magma ascent in the Mule Creek vent (USA). *Bull. Volcanol.* 58 (1996), pp.117-130.
- 8) Castro, J.M., Cordonnier, B., Tuffen, H., Tobin, M.J., Puskar, L., Martin, M. C., Bechtel, H. A. : The role of melt-fracture degassing in defusing explosive rhyolite eruption at volcan Chaiten. *Earth Planet. Sci. Lett.* Vol.333-334 (2012), pp.63-69.
- 9) Tuffen, H., Dingwell, D. : Fault textures in volcanic conduits: evidence for seismic trigger mechanisms during silicic eruptions. *Bull. Volcanol.* 67 (2005), pp.370-387.
- 10) Berlo, K., Tuffen, H., Smith, V.C., Castro, J.M., Pyle, D.M., Mather, T. A., Geraki, K. : Element variations in rhyolitic magma resulting from gas transport. *Geochim. Cosmochim. Acta* Vol.121 (2013), pp.436-451.
- 11) Plail, M., Edmonds, M., Humphreys, M.C.S., Barclay, J., Herd, R. A. : Geochemical evidence for relict degassing pathways preserved in andesite. *Earth Planet. Sci. Lett.* Vol.386 (2014), pp.21-33.
- 12) Yoshimura, S., Nakamura, M. : Fracture healing in a magma: An experimental approach and implications for volcanic seismicity and degassing. *J. Geophys. Res.* Vol.115 (2010). doi: 10. 1029/2009JB000834.