

火山噴火を決める要素

Factors that Control Volcanic Eruption

鍵 山 恒 臣 (かぎやま つねおみ)

京都大学教授 理学研究科地球熱学研究施設

1 はじめに

火山噴火予知研究の進展によって、ある程度の観測を行っている火山では、噴火の前に何らかの異常を検知できるようになってきた。寝耳に水の噴火はほとんどないと言ってよいであろう。しかし、効果的な防災に結びつけるには、どのような噴火かどのような推移で起こっていくかを予測する必要がある。本稿では、噴火の様式や時間的推移に地盤がどのように関わっているかを議論する。

2 火山の噴火はマグマが決める？

ずっと以前、中学の理科の教科書を開いて見ると火山の話が出ていた。これは私の専門である。心ときめかせて中をのそいてみると、「玄武岩は、さらさらの溶岩なので楕状火山かてきる。色は黒い。流紋岩は粘り気のある溶岩なので溶岩トームかてきる。色は白っぽい。」子供は、これを試験に出るからと面倒そうに暗記していた。私はめまいを覚えた。これでは火山学は面白くないと教えているようなものである。玄武岩と楕状火山はこの教科書にも出てくるか、すこぶる評判の悪い単元である。読者諸氏も中学 高校時代に嫌な思いをされた方が多かったであろう。それはこの分類がつまらないからではなく、その教え方が悪いからである。世界のいろいろな火山の噴火を見ると、溶岩が俺のように流れる火山や大きな岩の塊かごろごろと転げながら迫ってくる火山もある。そうした違いはなぜだろうという「疑問」と、いろいろ調べた結果、溶岩の組成の違いで噴火の様子が違ってくるという「解き明かした喜び」を体験しない限り理科の面白さはわからないと思うのである。さて、話がそれてしまったが、さまざまな火山噴火は、マグマが急激な体積膨張を起こす素である「揮発性成分の量」とそれを簡単に逃がしてしまうかどうかを左右する「粘性」に大きく依存することがだいたいわかってきた^{1),2)}。珪酸の少ないマグマは珪酸の鎖が短いために粘性が低くなり、概して流れやすい。揮発性成分が多く、大量のカスがマグマから分離してくると、ちょうど空気が入ってしまった水道の蛇口のようにマグマを噴出してくる。少し古い話になるが、図一1に示す1986年の伊豆大島で発生した溶岩噴泉がその例である。同じマグマであっても、揮発性成分が少なくなると、液体として静かに流れ出してくる。一方、珪酸を多く含むマグマは珪酸の鎖が長くなり、



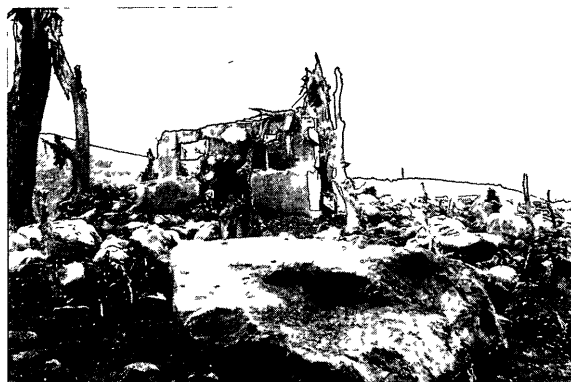
図一1 1986年伊豆大島の噴火。マグマが噴水のように噴出していることから「溶岩噴泉」と呼ばれる。やや左に見える異い煙は、開口したばかりの火口からの噴煙である。まだ地下水の影響が残っているため真っ赤な噴泉になっていない。

粘性は高くなる。カスは簡単に抜けなくなるので、マグマ全体が体積を膨張させて爆発することになる。揮発性成分が乏しい場合には、トームを作ることになる。以上か珪酸の量でマグマを分類する話のゆえんである。ややこしいのは、珪酸の量だけが粘性を決めているのではなく、ある金属元素が入ると、珪酸の鎖を断ち切る役割を果たすことになり、同じ珪酸の組成を持つマグマであっても、含まれる金属元素によって粘性が大きく異なることがあるといった特殊な事情があることである。しかし、基本的には、マグマの粘性と揮発性成分が火山噴火の様子を大きく左右していることになる。「マグマを知れば噴火がわかる」と言われるゆえんである。ちなみに、先ほどの教科書の話は、揮発性成分の量を無視して珪酸の量だけで火山噴火の様式を分類しようとするものであり、現実の火山噴火には当てはまらない。

3 媒質がコントロールする火山噴火

以上の話を讀んだ読者諸氏の中には、それはちょっと違うと思われた方も多いてであろう。そんなに事が単純なら、火山噴火予知はもっと簡単なはずである。しかし、現実には世の火山学者は社会からそれほど信用されていない。言い訳めいて恐縮であるが、マグマを知るだけでは火山噴火を知ることはできないのである。たとえば、1983年の三宅島の噴火では、同じマグマの噴火でありながら、山腹では噴水のように溶岩が噴出する「溶岩噴

論文

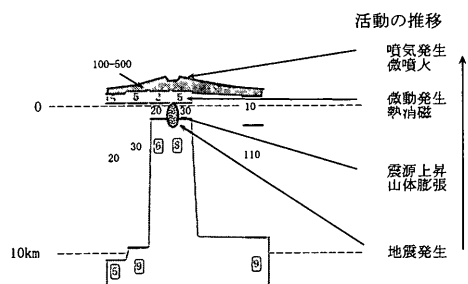


図一2 1983年三宅島噴火の際、海岸部ではマグマと地下水が接触し、マグマ水蒸気爆発が発生した。1 m を越える巨岩によってコンクリート製の建物も破壊された。

泉」となり、海岸付近では高温のマグマか地下水と接触することで激しい「マグマ水蒸気爆発」となった。直径1 km ほどの爆裂火口が生じ、付近には図一2に示すように直径1 m を越える岩塊が散乱していた。こうした噴火の違いは、地下水が多く存在するかどうかによって生じている。図一1に示す伊豆大島の噴火でも、中央の溶岩噴泉の左に黒っぽい噴煙が見えている。この噴煙は、今まさに新しく開口した火口から噴火が始まった段階であり、周辺の地下水と接触したことによってマグマが急冷破碎され、細かい火山灰、ないしは火山カラスとなって噴出しているために黒っぽく見えている。しばらく時間が経過した後は、周りと同じように真っ赤な溶岩噴泉となるものである。このように、火山噴火はマグマの性質が分かれば、すべて解決するものではなく、マグマが上昇してくる場の性質に大きく左右されるのである。以下では、媒質の性質の一例として、比抵抗が火山活動とどのように関係しているかを紹介しよう³⁾。

3.1 火山の比抵抗構造

火山で地下の比抵抗を測定すると、図一3に示すような4層構造を示す。第1層は比抵抗が大きく、数100から数k Ω mとなる。この層は、空隙の多い溶岩やその他の火山噴出物の層である。厚さは場所によってまちまちであるが、数10 m から数100 m 程度である。その下の第2層は、比抵抗が低く、数10 Ω m 程度を示す。この層は、地下水を多く含む層と考えられている。伊豆大島や鹿児島県南西諸島の諏訪之瀬島などの火山島では、この層の上面の高さは毎水準とほぼ一致している。地熱活動を持つ火口付近では、この層の比抵抗はさらに低くなり、数 Ω m 程度となることもある。これは、空隙を熱水が占める層や熱変質を受けた層が複合的に集まった状態と考えられる。我々はこの層を浅部低比抵抗域と呼んでいる。この層とその下の高比抵抗の第3層との境界の深さは場所によって変わるが、毎抜下1～3 km 程度に限られている。その理由は、空隙が圧密によってつぶされ、地下水がほとんど存在しなくなるために高比抵抗になると考えられる。その下の第4層は、必ずしもすべての火山において確認されているものではないが、



図一3 1983霧島 新燃岳の比抵抗構造と噴火の前兆の発生域⁴⁾

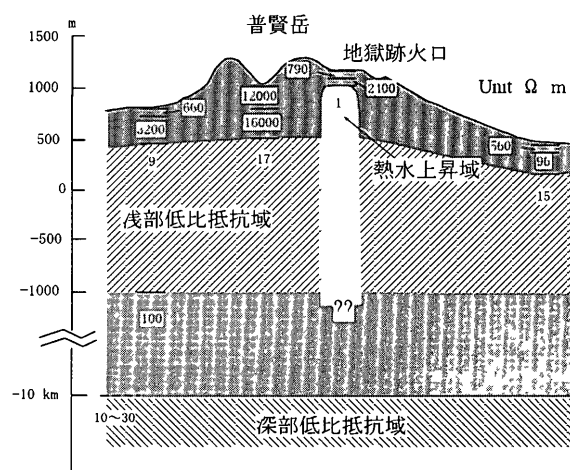
10～30 km 程度の深さに見られる。この層は、マグマやマグマを生成する際に重要な役割を果たす水が存在する領域と考えられている。この層を我々は浅部低比抵抗域と呼んでいる。こうした構造が火山活動とどう関連するかを以下に紹介する。

3.2 浅部低比抵抗域と噴火の前兆

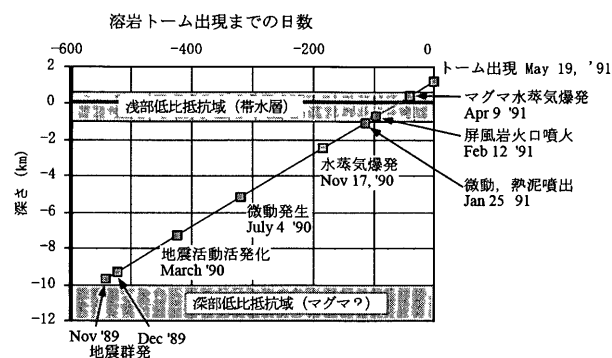
霧島 新燃岳では、しばしば火山性地震が群発し、火山灰を噴出する微噴火や異常噴気が発生している。これらの現象を精密に調査すると、図一3に示すような結果が得られている。まず、群発地震は第4層（浅部低比抵抗域）の最上部で始まり、しだいに浅部に拡大していく。その際に、第3層で膨張が起きる。震源が第2層（浅部低比抵抗域）に達すると、火山性微動が発生し、地下の温度上昇によって岩石の帯磁が減少する熱消磁が観測される。それとともに、火口から噴気か異常に噴出したり、火山灰を噴出することになる。この事例では、第2層の水とマグマないし高温の火山カスとが接触することで噴火の前兆現象が生じていることがわかる。仮にこの層が存在しなければ、噴火の前兆現象は今とはずいぶん違ったものになるであろう。

3.3 浅部低比抵抗域と噴火様式

第2層は、噴火の前兆だけではなく、噴火の様式にも大きく影響している。その例を雲仙 普賢岳で紹介しよう。雲仙 普賢岳の噴火は、以下のような経過で進化した。1989年末に島原半島西部の地下10 km 程で地震の群発が始まった。震源は東に移動するとともに、しだいに浅くなっていった。1990年7月には山頂付近で火山性微動が確認されるようになり、11月17日に噴火が始まった。この噴火は、比較的低温で、130℃程度の水蒸気や火山灰、泥水を噴出するものだった。この噴火はすぐに減衰し、このまま終息かと思われていたが、1991年1月末に火山性微動が復活し、泥水を再び火口から噴出するようになった。2月12日には、別の火口（屏風岩火口）から規模の大きな水蒸気爆発を開始し、大量の火山灰を噴出した。更に4月9日からはマグマ水蒸気爆発が頻発し、約40日後の5月20日には溶岩トームの出現が確認された。これ以降は火砕流が頻発し、大きな災害となったので記憶されている方も多であろう。この一連の噴火は、熱泥噴出、水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発、マグマ噴火と変化していったが、なぜこのような変化が起きるのであろうか？ 一般的には、こう

図一4 雲仙 普賢岳周辺の比抵抗構造⁵⁾

した噴火様式の違いは、マグマと地下水かふつかり合うときの両者の比率の違いによって生じると理解されている。雲仙 普賢岳の地下構造は、図一4に示すようになっている。表層は空隙の多いブロック状溶岩の層で、数 $k\Omega \cdot m$ という高比抵抗を示す。その下の毎400～500 mの高さに第2層の浅部低比抵抗域が見られる。この層は毎1 km 程度まで続いている。山頂の地獄跡火口（その後トームが出現した火口）の直下だけは、特に比抵抗が低くなっており、熱水が上昇している領域である。この第2層の下には高比抵抗の基盤が広がり、その下には、約10 kmの深さに第4層である深部低比抵抗域が広がっている。この4層構造は、霧島とはほぼ同じである。さて、トームが地表に現れた前後のマグマの上昇速度は1日に約20 mと推定されたので、毎1200 mの地点に5月19日にマグマが到達したとして、この日から逆算して噴火様式が変化した日にマグマがどこにいたかを計算してみよう。結果は、図一5のようになる。マグマ水蒸気爆発が発生した4月9日は毎400 mと計算され、第2層の上面の高さと一致する。また、屏風岩火口から水蒸気爆発が始まった2月12日や火山性微動が再開した1月下旬は、第2層の下面の高さにはほぼ一致する。もっと以前はどうであろうか？ 最初の噴火が発生した1990年11月17日には毎24 km、火山性微動が確認された1990年7月には約5 km、地震が群発を開始した1989年末にはおよそ10 kmと計算される。この10 kmという深さは、ちょうど深部低比抵抗域や群発地震の発生域の深さと一致する。こうしたことから、雲仙 普賢岳の噴火は以下のように進行していったと考えられている。1989年末に地震を伴いながらマグマが上昇を開始した。その際、マグマから分離した火山ガスが先に上昇し、第2層の地下水とふつかり火山性微動を発生させながら水蒸気を生産した。水蒸気の量が増大して限度を越えたため熱泥噴出を1990年11月に行い、生成された水蒸気が消費されたため活動は一旦減衰した。その後、遅れて上昇してきたマグマが第2層の地下水

図一5 マグマの上昇速度を1日20 mとした場合に計算される雲仙 普賢岳の噴火の節目におけるマグマの位置⁵⁾

にふつかり、微動を発生させながら水蒸気を生成した。前者の火山ガスに比べてマグマ本体の熱容量は大きいので、噴火の規模も大きくなった。やがて、マグマは第2層の上面付近に到達し、封圧が低くなったために激しいマグマ水蒸気爆発を発生させるようになった。そして、地表に到達したのである。

4 おわりに

簡単ではあるが、ここに示したように、火山噴火はマグマそのものの性質によってその様相を大きく変え、それによって引き起こされる災害にも大きな違いが生じる。しかし、それだけではなく、マグマが上昇してくる媒質、すなわち地盤の特性によっても噴火や災害の様相が大きく変わることがわかる。とりわけ、第2層の役割が重要である。噴火の前兆である火山性微動や山体の膨張、地熱 火山ガス異常など多くの前兆現象もこの第2層の中で発生している。ここでは、詳しくは示さないが、第2層が、山体崩壊のすべり面となっている場合もある。諏訪之瀬島では、山頂に山体崩壊によってできた馬蹄形カルデラが東に開いている。比抵抗構造を調べると、第2層の上面の高さかちょうどこのカルデラの底部の高さに一致する。同様の結果は磐梯山などでも見られる。火山噴火予知 防災の前線では地下の構造を知ることがますます重要となっている。

参考文献

- 1) 藤井敏嗣 マグマ、マグマダイナミクスと火山噴火、朝倉書店、pp 42～66, 2003
- 2) 井田喜明 マグマの上昇と火山噴火の物理、マグマダイナミクスと火山噴火、朝倉書店、pp 67～78, 2003
- 3) 鍵山恒臣 火山の物理構造、マグマダイナミクスと火山噴火、朝倉書店、pp 25～41, 2003
- 4) 鍵山恒臣 火山体構造探査と噴火予知、火山、Vol 42, pp 115～118, 1997
- 5) Kagiya, T, Utada, H and Yamamoto, T Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure, Jour Volcanol Geotherm Res, Vol 89, pp 35～42, 1999

(原稿受理 2004 10 25)