総 説

水蒸気噴火の地質学的研究

Geological study of phreatic eruptions

Abstract

及川輝樹* 大場 司** 藤縄明彦***
佐々木 寿****

Teruki Oikawa, Tsukasa Oba**,
Akihiko Fujinawa*** and
Hisashi Sasaki*****

2017年6月19日受付.
2017年11月21日受理.

* 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門
Geological Survey of Japan, AIST, 1-1-1 Higashi,
Tsukuba City, Ibaraki 305-8567, Japan

** 秋田大学国際資源学部
Faculty of International Resource Sciences,
Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi,
Akita City, Akita 010-8502, Japan

*** 茨城大学理学部
College of Science, Ibaraki University, 2-1-1
Bunkyo, Mito City, Ibaraki 310-8512, Japan

**** アジア航測株式会社
Asia Air Survey Co., Ltd., Shinyuri 21 Building,
1-2-2 Manpukuji, Asao-ku, Kawasaki
City, Kanagawa 215-0004, Japan

Corresponding author: T. Oikawa,
teruki-oikawa@aist.go.jp

Phreatic (non-juvenile) eruptions are the most common type of magmatic activity on Earth. Here we review the characteristics of phreatic eruptions, which occur when overheated water is rapidly vaporized. Tephra layers produced by phreatic eruptions are composed mainly of clay-rich volcanic ash with variably altered lapilli and volcanic blocks. A single phreatic eruption can last between one hour and one day; however, eruptions may occur successively over a period of years to decades. The total volume of tephra produced by a phreatic eruption is typically 10^{4-6} m^3 , maximum $<10^8 \text{ m}^3$. Phreatic eruptions may be accompanied by diverse phenomena, including: tephra fallout, ejected rock fragments, low-temperature pyroclastic flows, and syneruptive-spouted type lahars. There are few detailed descriptions of low-temperature ($\sim 100^\circ\text{C}$) pyroclastic flows and syneruptive-spouted type lahars associated with phreatic eruptions. Detailed studies of phreatic phenomena are required, as it remains difficult to identify and reconstruct these processes based on the characteristics of the deposits.

Keywords: phreatic eruption, hydrothermal eruption, tephra, ejected rock fragments, pyroclastic flow, pyroclastic density current, syneruptive-spouted type lahar, Japanese Island

はじめに

水蒸気噴火は、発生頻度も高く、地球上でもっともありふれた噴火である。日本列島の陸上で発生した水蒸気噴火は、西暦1900～2015年の116年間に限っても、36の火山において116例の活動が知られている(Table 1)。単純に頻度をみると、1年に1回はどこかの火山で水蒸気噴火が起きることになる。日本列島においては、高度に土地利用が進み、火口近くまで多くの人が立ち入るような状況になっている。そのため、御嶽火山2014年噴火を例に出すまでもなく、このような高頻度に発生する噴火を理解することは防災上重要な課題である。また、水蒸気噴火は、火成活動に伴う熱水系の発達と密接にかかわる噴火であるため、火山の熱システムの理解を深めるうえでも、その理解は必要である。しかし、我が国の火山地質学の研究は、主に岩石学を基礎とする研究者が多くかかわってきたためか、マグマ物質の噴出を伴わない水蒸気噴火の火山地質学的研究は、これまであまり進んでいなかった。

近年、水蒸気噴火堆積物を対象とした火山層序学的研究、

噴出物中の粘土鉱物を中心とした記載岩石学的研究、詳細な噴火の観察や復元などが行われ、水蒸気噴火の理解が深まってきた。特に、噴火の原動力がマグマの発泡現象から水(マグマ中に含まれない外来水)の膨張に置き換わっただけで、マグマ噴火に劣らない多様性があることが明らかになりつつある。本論では、水蒸気噴火の定義・用語・発生機構等についての解説を行った後、最近25年程度に行われた研究のレビューを中心に、水蒸気噴火研究の現時点の到達点を明らかにする。まとめた内容は以下の項目である。噴火の規模・頻度(層序学、噴火の記載・復元)、噴火推移のパターン(層序学、噴火の記載・復元)、噴出物に含まれる熱水変質鉱物(記載岩石学)、水蒸気噴火で発生する現象(噴火の記載・復元)。なお、日本列島はとりわけ、水蒸気噴火の科学的な観察記録が多い地域である。特に最近約25年程度の間に、多数の詳細な噴火の記録や研究が行われている。そのため、本レビューも日本列島の事例が中心となる。

水蒸気噴火とは—定義・用語

一般に水蒸気噴火とは、マグマなどの熱で熱せられた水や

Table 1. Phreatic eruptions from volcanoes in the Japanese Islands between 1900 and 2015, based on data from GSJ (URL 1) and JMA (URL 2). Underlined years indicate phreatic eruptions associated with magma eruptions.

Volcano name	Eruption year	Volcano name	Eruption year
Chacha	1974–75, 1978	Asama	1965, <u>1982–83</u> , 1990, 2003, 2008–09, 2015
Shiretoko-Io	1935–36	Niigata-Yakeyama	1949, 1962–63, 1974, 1983,
Meakan	1932, 1957–55, 1960–58, 1962, 1966–64, 1988, 1996, 1998, 2006, 2008	Yakedake	1907–27, 1919, 1922–27, 1929–32, 1935, 1939, 1962–63
Tokachi	1926–28, <u>1961–62</u> , <u>1988–89</u> , 2004	Nakanoyu Onsen (Nakanoyu Hotspring)	1995
Tarumae(Tarumai)	1978–79	Ontake	1979, 1990, 2007, 2014
Usu	<u>1910</u> , <u>1944–45</u> , <u>1977–78</u> , <u>2000</u>	Hakone	2015
Hokkaido-Komagatake	1905, 1919, 1923–24, 1937, 1942, 1996, 1998, 2000	Izu-Oshima	1955–56, 1990
Iwate	1919	Miyake	1900, <u>2000–02</u>
Akita-Yakeyama	1929, 1948–49, 1951, 1957, 1997	Izu-Torishima	1902, <u>2002</u>
Sumikawa Onsen (Sumikawa Hotspring)	1997	Ioto	1922, 1935, 1944, 1957, 1967–69, 1978, 1980, 1982, 1994, 1999, 2001, 2004, 2007, 2012, 2015
Akita-Komagatake	1932	Kuju	1995–96
Chokai	1974	Unzen	<u>1990–95</u>
Kurikoma	1944	Shinmoedake (Kirisimayama)	1959, 1991–92, 2008, <u>2010–11</u>
Onikobe (Onikobe Geothermal Power Plant)*	2010	Tearai Onsen (Tearai Hotspring)	1971
Azuma	1950, 1977	Sakurajima	<u>2006–07</u>
Adatara	1900	Satsuma-Io	1998–2004, 2013
Nasu	1953, 1960, 1963	Kuchinoerabu	1980, 2014, 2015
Kusatsu-Shirane	1900, 1902, 1905, 1925, 1927–28, 1932, 1937–39, 1940–42, 1958 or 59, 1976, 1982–83	Nakanoshima	1914
		Io-Torishima	1903, 1968

水蒸気が地下浅所で急激に膨張することにより、周囲の岩石などの固形物を吹き飛ばして発生する噴火である(例えば、久野, 1953; 遠藤・小林, 2012)。そのため噴出物には新鮮なマグマ片(本質物)が含まれず、しばしば熱水変質によってつくられた粘土鉱物を多く含むのが特徴である(小坂, 2003; 大場, 2011)。本論では水蒸気噴火の定義を、ほぼ大場(2011)に従って、新鮮なマグマ片(本質物)を含まず(含んでいたとしても極々微量で)、既存の火山体起源の固形物(岩片、粘土)およびH₂Oを主成分とする液・気相を放出する噴火を水蒸気噴火とよぶ。なお、本質物の定義は、「火口から放出され地質ユニットとして定置するまでないし、放出の直前まで塑性変形が可能な程度の流動性を有する固体・液状のマグマ物質」とする。ちなみに、マグマ噴火は、マグマ中に含まれる揮発性成分の発泡によって、マグマが自発的に地表に噴出する噴火である。地下においてマグマの関与があったとしても、マグマの発泡による自発的な上昇および地表への噴出がなく、噴出物に本質物を含まない噴火は、本論では水蒸気噴火に分類する。

水蒸気噴火の類似現象として間欠泉や噴気活動の活発化などH₂Oを主成分とする液・気相が放出する類似の現象も存在するが、固形物の放出がほとんどないことから区別する。また、油・ガス田地域では、泥火山(mud volcano)とよば

れる高圧の間隙水や石油・ガスの噴出によって泥や岩片で形成された円錐状の地形的な高まりが存在することが知られている(Bates and Jackson, 1987; 千木良・田中, 1997)。前述の定義を適応すると泥火山における噴出も水蒸気噴火となるが、一般的な噴火現象に比べて規模が小さく爆発的にならないこと、非火山地帯でも発生することから本論では扱わないこととする。さらに、地熱地帯でも温泉水の湧出や噴気活動の活発化などに伴い、同様の泥火山が形成されることがある(例えば、大沢ほか, 1996)。これは、後述の火口噴出型ラハールの極小規模なものにとらえることもできるが、これもまた本論では扱わない。

水蒸気噴火の訳語として Phreatic eruption がしばしばあてられる。“phreatic”とは、表層付近の地下水、しばしば地表とつながっているものを指す言葉である(Barberi et al., 1992)。Phreatic eruption と似た概念の噴火に別の用語(Hydro-explosion; Steam-blast eruption; Hydrothermal explosion(or eruption))も使用されていることから、Phreatic eruption の用語の使用は少々混乱している(Barberi et al., 1992)。Barberi et al.(1992)は、マグマが地表の水と接して発生する爆発的な噴火を Hydromagmatic eruption、マグマが地下水に直接触れて発生する爆発的な噴火を Phreatomagmatic eruption と区分し、単純に地下に

閉じこめられた水蒸気やガスが急膨張して爆発するものを Phreatic eruption とした。その一方、Browne and Lawless (2001) は、本質物を含まず、熱水系からのエネルギーのみですでに固結した物質のみを固体として放出する噴火を Hydrothermal eruption、マグマが低温の地下水に触れることで生成された過熱水から発生するフラッシュ蒸気によって周囲の母岩(本質物は含まない)を放出する噴火を Phreatic eruption、そのような噴火に本質物が混ざるものを Phreatomagmatic eruption、熱水系に貫入マグマが直接接することにより母岩と本質物を放出する噴火を Magmatic-hydrothermal eruption と区分した。このように水蒸気噴火は、マグマが地下水に直接接するか否かと噴出物に本質物が入っているか否かで区別されている。しかし、マグマが地下水に接したかどうかは直接観察・観測された噴火においても判断がつかないことが多いだろう。そのため、本論では地下でのマグマの関与の有無は問わずに、本質物を含まず水蒸気の急激な膨張で発生する噴火を水蒸気噴火とよび、そのような本質物を噴出物に含まない噴火(non-juvenile eruption)に対して、Phreatic eruption の語を当てる。なお、水蒸気噴火(phreatic eruption)は、水蒸気爆発(phreatic explosion)ともいわれるが、爆発とよべるほどの短時間で激しい圧力変化を伴わない水蒸気噴火も発生している(例えば、新潟焼山 1997-98 年噴火: 伊藤ほか, 2000)。そのため本論では水蒸気噴火を使用する。

発 生 機 構

水蒸気噴火は、マグマそのものの発泡やそれに関連した破碎を原動力とする噴火でない。噴火の原動力は地下の水が急激に多量の水蒸気となることや火山ガスによる増圧であり、その結果、周囲の固形物を吹き飛ばすことで発生する噴火である。その要因としては、①地下の空間に溜まったガス圧の増加、②過熱水からのフラッシュ蒸気の発生、③噴気の増大などが考えられる。これらのうち②がもっとも主要な発生機構と考えられている。以下、それぞれの具体的な解説を行う。なお、①~③とも、噴火の準備過程として、火山体浅所の熱水系の活発化や、低温の地下水が過熱水へ変化する過程があると考えられる。このような変化は、地下浅所へのマグマの貫入を伴う場合と伴わない場合があるが、最終的に発生する水蒸気噴火は、いずれも似たものになる。そのため、本項ではマグマ貫入の有無について特に区別せずに、準備過程を除いた、水蒸気噴火の直接的な発生要因・機構について議論する。

まず①の水蒸気噴火の発生要因として、地下にガス溜まりのようなものが形成され、それが増圧し、周囲の岩石を破壊することで発生することが考えられる(例えば、Barberi et al., 1992)。このような噴火は、噴出物中での本質物の有無が異なるだけで、ブルカノ式噴火の発生機構と大差はない。そのため、小規模で本質物を含む割合が少ないブルカノ式噴火と区別は難しく、連続的に変化している可能性が高い。例えば、浅間火山 2009 年噴火(前野ほか, 2010)や口永部島火山 2014, 2015 年噴火(Geshi et al., 2016)などが、そのよ

うな遷移的な噴火と考えられる。なお、ガス溜まりの壁岩の破壊は、地下深くなると静岩圧が高くなるため困難になる。そのため、このような噴火は地下浅所で発生しやすいと考えられる。また、このような単純なガス溜まりの増圧による噴火は、過熱水の急激な相転移を伴う噴火にくらべて、爆発力が弱いことが知られている(Mayer et al., 2015)。つまり、比較的規模の大きな水蒸気噴火は、次に述べる②過熱水のフラッシュ蒸気の発生によるものと考えられる。

②のような、地下で過剰に熱せられた水(過熱水)が減圧することで発生する蒸気(フラッシュ蒸気)の急激な膨張による噴火は、多くの研究者が主要な水蒸気噴火のメカニズムと考えている(例えば、Muffler et al., 1971; Hedenquest and Henley, 1985; Yamamoto et al., 1999; Browne and Lawless, 2001; 大場, 2011; 山元, 2014; Mayer et al., 2015; 及川, 2016a; Oikawa et al., 2016; Maeno et al., 2016)。同様の機構による爆発は、工学分野では BLEVE (Boiling liquid expanding vapor explosion) や相平衡破綻型水蒸爆発と呼ばれている(Abbasi and Abbasi, 2007; 小木曾・上原, 1985)。1 気圧下の水の沸点は 100°C であるが、圧力が高い状態では 100°C 以上の液体の水が存在する(例えば、Fig. 1 の A)。そのような過剰に熱せられた水は過熱水とよばれる。過熱水の状態にある液体の水が急激に減圧されると、その過熱水は沸点以上の状態におかれる(例えば、Fig. 1 の A→B の変化)。その結果、過熱水が急激に相転移し、水蒸気(フラッシュ蒸気)化し急激に膨張する。その膨張によって周囲の岩盤を吹き飛ばし水蒸気噴火が発生する。過熱水が大気圧まで減圧した結果、発生するフラッシュ水蒸気の割合は、減圧過程で熱の損失がないとすると、次式で示される(Marini et al., 1993; 山元, 2001)。

$$m_w C_w (T_w - T) + m_r C_r (T_w - T) = X m_w L$$

$$\text{ないし、} [(C_w + C_r/R) (T_w - T)]/L = X$$

ただし、X: 過熱水がフラッシュ蒸気に転移する率(フラッシュ率)、 m_r : 岩石(テフラ)の質量、 m_w : 過熱水の質量、R: 水/破碎された岩石(テフラ)比、 C_r : 破碎された岩石(テフラ)の定圧比熱(=1200 J/kg K)、 C_w : 水の定圧比熱(=4200 J/kg K)、L: 水の気化熱(=2.3×10⁶ J/kg K)、 T_w : 過熱水の温度、T: 大気圧での水の沸点である。この式に従うと、過熱水が高温なほどフラッシュ蒸気への転移が高いため、より規模の大きな爆発になる可能性が高い。なお、液体の水から水蒸気への相転移による体積変化は、大気圧下とそれより高圧力で比べると、圧力降下量が同じであっても高圧力であるほうが小さい。そのため、過熱水の相転移によって発生する噴火も、地下浅所でしか発生しない。さらに水は 374°C、218 気圧以上となると、超臨界状態となり相転移による体積増加はおこらなくなる。表層の岩石の密度を仮に 2.5~2.0 g/cm³ とし静岩圧を考えると、218 気圧になる地点は地下約 0.9~1.1 km となる。そのため、地下浅所でないと水の相転移による体積膨張に起因した噴火は発生しない。また、噴火(爆発)の最初の発生深度は地下浅所だが、爆発により上方の岩圧が取り除かれることにより、爆発深度が深いほうに進展することも考えられる。実際、中の湯

Fig. 1. Water phase diagram.

1995 年爆発では、最初に地表付近で発生した爆発が、徐々に深い深度まで及んだことが、噴出物などの解析から推定されている(三宅・小坂, 1998)。

フラッシュ蒸気の発生に必要な急激な減圧は、過熱水の溜まり(熱水溜まり)にかかっている圧力低下で発生する。熱水溜まりの周囲の圧力は、理想的には岩石の自重による圧力(静岩圧)と地下水の自重による圧力(静地下水圧)の和であると考えられる。そのため、熱水溜まり上の地下水の水位が急激に下がることなどによる周囲の水圧の変化や、熱水溜まり周囲の壁岩が物理的に破壊され周囲の岩圧が低下することで主に引き起こされる。

壁岩の物理的な破壊は、1) 火山ガスや過熱熱水流体の注入や、加熱による圧力上昇の結果による破壊、2) 熱水溜まりから放出されていたガスや水蒸気の通路がふさがれて、内圧が上昇した結果による破壊、3) 地震活動やマグマの貫入による地殻変動に起因する破壊や応力変化、4) 地すべりなどの土砂の斜面移動による破壊など、多岐の要因によって引き起こされる。これらのうち 2) や 4) などの通路の閉塞や地すべりなどの土砂移動に伴う噴火は、活火山の火口近傍のみならず、活発な地熱地帯などでも発生するので注意が必要である。近年でも手洗温泉 1971 年、中ノ湯 1995 年、澄川温泉 1997 年、鬼首地熱発電所 2010 年などの活発な地熱地帯で水蒸気噴火が発生している(Table 1)。大場(2011)は、水蒸気噴火の発生機構を、土砂移動の有無とマグマ貫入の有無で整理して、それぞれの実例や特徴を示した。

また、地下深部に存在した過熱水(熱水)が岩脈状に地表付近に上がることによって、上昇に伴う圧力低下で過熱水が相転移を起こし発生する噴火も考えられる。実際に、御嶽火山 2014 年噴火では、発生の 10 分前から火口直下の震源の深さが急激に浅くなり噴火に至っている(Kato et al., 2015)。この観測結果は、過熱水(熱水)脈の上昇が噴火の原因になったと考えれば説明できる。さらに Kato et al. (2015) が示した噴火後に震源が深くなることは、噴火により上部の岩盤が取り除かれより深部の圧力が下がり、より深部の過熱水が爆

発できるようになったためと解釈できる。

その他、③とした火口から噴気の増大の結果、火道周辺の固形物を吹きとばすような噴火も考えられる。弾道を描いて飛来する岩塊(投出岩塊)を欠くような顕著な爆発を伴わず、噴出物量も小さい噴火は、そのような発生機構で説明できる。例えば、新潟焼山の 1997–98 年における噴気活動の活発化に伴う火山灰の放出(伊藤ほか, 2000)は、③の発生機構で起こった可能性が高い。

なお、特に①と②の発生機構では、噴火の直前には、周囲の岩盤を破壊するだけの圧力をもったガスや過熱水の溜まりが形成されている必要がある。このような“溜まり”は浸透率の低い帽岩(cap rock)などの下に形成されると考えられている(例えば, Hedenquest and Henley, 1985; Browne and Lawless, 2001)。熱水系では、熱水からの鉱物の析出や岩石の変質によって岩石中のクラックがふさがれる自己閉塞(self-sealing)作用によって浸透率の低い帽岩が形成されやすいと考えられている(例えば, Hedenquest and Henley, 1985)。これは、水蒸気噴火が頻発する火山では、熱水系の発達していることが多い(例えば, 大場, 2011)ことと調和的である。しかし、これら“溜まり”が具体的にどのように形成されるか、つまり水蒸気噴火発生の準備過程は、十分明らかになっていない。単一の“溜まり”の形成過程など比較的短い時間スケールの現象と“溜まり”ができやすくなるような熱水系の発達過程など長期的な時間スケールの両面からの発達史の解明が必要であろう。

水蒸気噴火の規模

水蒸気噴火におけるテフラの総噴出量は、確認された最大のもは 10^7 m^3 オーダである。つまり、火山噴火としては、小～中規模のものが発生している。

近年、日本列島で発生した水蒸気噴火によるテフラ量は、 10^9 kg (100 万トン) オーダのものを上限として、 $10^{8\sim7} \text{ kg}$ (10～1 万トン) オーダのものが多い(Table 2)。なお、御嶽火山 2014 年噴火の総テフラ量はおよそ 10^9 kg である(Maeno et al., 2016; Takarada et al., 2016)。一方、奥野(1995, 2002)によると、日本列島において地層として残されている水蒸気噴火堆積物は、 10^7 m^3 オーダのものを上限にして、 10^6 m^3 オーダのものが一番多い。これは、堆積密度を 1000 kg/m^3 とすると、 10^{10} kg オーダのものを上限として、 10^9 kg オーダのものが一番多いということになる。ニュージーランドでの例からも、テフラ量は $10^{3\sim7} \text{ m}^3$ オーダの範囲に収まる(Browne and Lawless, 2001; Mayer et al., 2015)。そのため、水蒸気噴火により放出されるテフラ量の上限は 10^7 m^3 (10^{10} kg) オーダであると考えられる。奥野(1995, 2002)のまとめを踏まえると、近年の日本列島で記録された噴火より大きな水蒸気噴火が発生していることを示唆している。また、そのような比較的規模の大きな噴火は希でないともいえる。

水蒸気噴火のテフラは、本論の定義からも火口周辺ないしその地下にすでに存在していた岩石や堆積物からのみで構成されている。水蒸気噴火によるテフラ総量に上限があること

Table 2. Total volume and mass of tephra generated by recent phreatic eruptions.

Volcano	Eruption year	Tephra volume (m^3)	Tephra weight ($\times 10^7 \text{kg}$)	Ref.
Meakan	2008		1.2	Ishimaru et al.(2009)
	2006		0.9	Hirose et al.(2007b)
	1998		0.11	Hirose et al.(2007a)
	1996		3.6	Hirose et al.(2007a)
Usu	2000(Apr. 1-2)		2.1	Takarada et al.(2001)
	2000(Apr. 4)		4.9	Takarada et al.(2001)
Hokkaido-Komagatake	1996		12	Ui et al.(1997)
Akita-Yakeyama	1997	1×10^3		Ohba et al.(2007)
Asama	2008		2.8-3.5	Maeno et al.(2010)
Ontake	1979	$0.95-1.23 \times 10^6$	186	Maeno et al.(2016), Takarada et al.(2016)
	2014		63-140	Maeno et al.(2016), Takarada et al.(2016)
Hakone	2015		0.01	Mannen(2016)
Shinmoedake (Kirisimayama)	2008		19	Geshi et al.(2010)

は、この周囲の岩石等を吹き飛ばせる能力、すなわち爆発力に上限がある、ないし、吹き飛ばせる岩石等の量が限られているためと予想される。前者は、岩石の引張強度には限りがあるため、地下にためられる圧力には上限があること、後者は、水蒸気噴火の発生深度が地下浅所に限られるため、吹き飛ばせる岩石の量はおのずと限られると考えられることと調和的である。

なお、地層中に残されている噴出物量は、噴火直後に測定したものに比べて数分の1から1桁ほど減少している(奥野, 1995, 2011; 及川ほか, 2002 など)。つまり、地層に保存される噴火は、比較的規模の大きなものに限られること、また地層から復元される噴火の規模は、観測されたものより小さくなることに留意する必要がある(及川ほか, 2002; 奥野, 2011)。この体積の減少は、堆積後の圧密による層厚の変化や、噴火後に侵食や擾乱をうける(例えば、及川ほか, 2017)、地層として保存されないことが原因と考えられる。噴火の数十年後の調査で作成されたテフラのアイソパックは、噴火直後に作成されたものと比較すると、層厚の減少のみならず分布の形や軸の方向が異なる例が認められる(Fig. 2)。奥野ほか(2010)は、この減少は噴火後の圧密の効果が主であると考へた。しかし、堆積後の侵食も考慮に入れないと、分布の形態や軸が異なることは説明できない。後年の調査のもののほうが分布面積も狭くなる傾向が認められるので、体積減少の原因は侵食の効果が大きいと考えられる。

噴火史研究

小規模な噴火によるテフラは、大規模なものに比べ層厚は薄く分布面積も狭いため、その存在を確認するためには火口近傍の火山体内での丁寧な調査が必要である。そのため、水蒸気噴火などの比較的小規模な噴火を対象とした火山層序学的研究(噴火史研究)は、近年まであまり行われてこなかった。しかし、山地上部の表層に発達する泥炭や黒泥などの土壌中には、層厚の薄いテフラが保存されていることは古くか

ら知られていた。そのような場所に保存されている小規模なテフラを対象とした火山層序学的研究は、守屋以智雄氏らの研究グループが1980年代に中部地方のいくつかの火山で行った研究(小林ほか, 1982; 守屋, 1994)や遠藤(1985)の白山火山での研究が、初期のものとしてあげられる。その後しばらくは同様の研究は活発で無かったが、テフラ層直下の腐植質土壌層のヒューミンの ^{14}C 年代値が直上のテフラの年代をほぼ示すことが明らかになったこと(Okuno et al., 1997; 奥野, 2011)、加速器質量分析法(AMS法)炭素年代測定法の普及から年代測定に必要な土壌試料の量がおおよそ1g程度と少なくなった結果(例えば、中村, 2003)各噴出物に年代値を入れることが可能となったことなどから、ここ20年程で広く行われるようになってきた。近年ではこのような調査法の留意点なども奥野(2011)や及川(2011)にまとめられている。

このような小規模なテフラも対象とした噴火史研究は、気象庁常時観測50火山に限ると、以下の18で行われている：アトサヌプリ(長谷川ほか, 2017)、十勝岳(藤原ほか, 2007)、大雪火山群(旭岳)(石毛・中川, 2017)、倶多楽(Goto et al., 2015)、(北)八甲田山(工藤ほか, 2000; 工藤ほか, 2003)、秋田駒ヶ岳(和知ほか, 1997; 藤縄ほか, 2004)、岩手山(伊藤, 1999)、鳥海山(大場ほか, 2012)、安達太良山(山元・阪口, 2000)、吾妻山(山元, 2005)、那須岳(山元, 1997)、箱根山(小林ほか, 2006)、焼岳(及川ほか, 2002)、由布岳および鶴見岳(藤沢ほか, 2002)、九重山(伊藤ほか, 2014)、阿蘇山(宮縁・渡辺, 1997, 2000)、霧島山(筒井ほか, 2005, 2007; 田島ほか, 2013, 2014)、口永良部島(下司・小林, 2006)。いずれも、従来あまり調査されてこなかった火口近傍に位置する火山体上の土層に挟まれる小規模なテフラについて、年代測定も含めて詳細な層序学的研究を行ったものである。また、これまで活火山でないと考えられていた日光男体山(男体火山)において同様の研究が行われ、マグマ噴火を含めて最近1万年間に複数回の噴火があったことが

Fig. 2. Isopach maps showing ash fall thickness immediately after an eruption and several decades later. (A) Ontake 1979 Tephra. Kn: Kengamine, Mr: Marishiten San, Ma: Mamadada Dake. (B) Shinmoedake 1959 Tephra (Okuno et al., 2010). Sm: Summit crater of Shinmoedake (Kirishima).

Fig. 3. Magnitude of eruptions at Yakedake volcano through time, after Oikawa (2002) and Oikawa et al. (2002).

判明した(三宅ほか, 2009; Ishizaki et al., 2010; 石崎ほか, 2013). これらの研究成果を基に, 気象庁は2017年に男体山を活火山と認定した. このように小規模な噴火も含めた噴火史の構築によって, 様々な火山の活動史の見直しが行われている.

さらにこれら調査の結果, 各火山において水蒸気噴火などの小～中規模な噴火と大規模な噴火の頻度や時間的関係が明

らかとなってきた. 一例として, 焼岳火山(及川, 2002; 及川ほか, 2002)の例をあげる. 焼岳火山の近年の記録に残る噴火活動は, 水蒸気噴火の活動のみであり, マグマ噴火との関係は不明であった. 最近約3千年間における小規模なテフラも対象にした詳しい火山層序をまとめた結果, 水蒸気噴火は100～数百年に1回程度の頻度で, 総噴出物重量は 10^{5-6} m^3 オーダーで, 噴火マグニチュード(早川, 1993; Pyle, 2000)に

換算すると1~2、マグマ噴火は数千年に1度の頻度で、総噴出量は $10^7 \sim 10^9 \text{ m}^3$ (多くは 10^8 m^3)オーダ、噴火マグマニチュードで3~5(多くは4)と、噴火のタイプごとに規模と頻度に一定の関係があることが示された(Fig. 3)。同様の結果は他の多くの火山でも認められ、比較的大規模な噴火の合間に小規模な噴火をより高頻度で繰り返す特性が明らかとなっている。

推移パターン

1回の水蒸気噴火の継続時間は、数時間から1日程度であることが多い。しかし、数~数十年もの間に複数回の噴火が断続的に頻発する例も認められる。ここでは、月~年単位の中長期的な推移と、日程度の期間以内に終了する単一の噴火イベントに相当する短期的な推移にわけて整理する。

1. 中長期的な噴火推移

水蒸気噴火の中長期的な推移は、及川(2016a)によると以下の3パターンに分けられる。①噴火の継続時間は数時間から1日程度であり、それが複数回頻発する場合でも、最初の噴火が最大規模で、長くても数ヶ月以内に終息するもの(焼岳火山1962~63年噴火、新瀉焼山火山1974年噴火、御嶽火山1979、2014年噴火、九重山1995年噴火、霧島火山新燃岳2008年噴火など)。②同程度の規模の水蒸気噴火を数~数十年頻発するもの。(吾妻火山1893~96年噴火、焼岳火山1907~39年噴火など)③水蒸気噴火の後、マグマ噴火に移行するもの(雲仙火山1990~95年噴火、霧島火山新燃岳2010~2011年噴火など)または、地下浅所にマグマが貫入してそれに関連して水蒸気噴火が発生するもの(有珠火山2000年噴火など)。近年の事例は、これらのうち①の場合で推移するものが多い。しかし、①~③の各パターンの詳しい推移過程や発生機構などについては十分に研究されていない。特に②の推移については、くわしくまとめられたものが少ないのが現状である。

なお、③のマグマ噴火に関連して発生したことが明確な水蒸気噴火は、水蒸気噴火の全体のおよそ1割程度である。日本列島で最近100年間に発生した水蒸気噴火116例の内、マグマ噴火への移行ないしマグマの強い関与が想定される噴火(例えば、クリプトドームの生成などに伴う水蒸気噴火)は12例であった(Table 1)。汎世界的に水蒸気噴火をまとめたBarberi et al.(1992)では、132例の噴火のうちマグマ噴火に移行したのは17例であった。これらの例から、水蒸気噴火からマグマ噴火に移行する頻度は、およそ1割程度であるといえよう。

2. 短期的な噴火推移

単一の噴火イベントの記載は数多く行われているが、発生機構まで結び付けて噴火の推移を議論したものは多くない。特に水蒸気噴火で発生する様々な噴火現象を、時系列に沿ってまとめ、議論したものは少ない。数少ない例として、磐梯火山1888年噴火(Yamamoto et al., 1999)や御嶽火山2014年噴火(Oikawa et al., 2016)の研究例があげられる。いずれの噴火推移も、①新たな火口を形成し噴火開始、②火砕流の発生、投出火山岩塊、火山礫・火山灰(御嶽山2014

年では乾燥した状態で)の降下、③噴煙高度の上昇と泥雨混じりのテフラの降下、④火口噴出型ラハールの流下と推移している。なお、磐梯山1888年噴火で発生した山体崩壊(岩屑なだれ)は、地震によって引き起こされ、火砕流の発生とほぼ同時に発生した(中村・グリッケン, 1988; Yamamoto et al., 1999)。このような推移は、①過熱水から多量のフラッシュ蒸気が発生することで噴火が発生し、周囲の岩盤を吹き飛ばし新たな火口を形成、②岩片を多量に含む重い噴煙の一部が崩壊して火砕流が発生、過熱水からのフラッシュ蒸気は高温のため液滴としての水を含まない乾燥した状態でテフラが放出、③上昇した噴煙が露点に達して水蒸気が水滴となり、テフラとともに降下(泥雨)、④フラッシュ蒸気になりきれなかった熱水が火口から流れてでラハールとして流下といったことで説明ができる(Oikawa et al., 2016)。つまり、過熱水が急激にフラッシュ蒸気となり発生する水蒸気噴火としては典型的な推移といえる。しかし、すべての噴火が必ずしもこのような推移をたどるわけではない。どのような条件が整うと各現象が発生しうるのはまだ十分に解明されていない。

熱水変質鉱物

地質学的には、噴出物の特徴による区分は重要である。水蒸気噴火の噴出物は、前述の本質物を含まないことが特徴である。もう一つの特徴として、熱水変質で生成された粘土鉱物を代表とする粘土サイズの粒子を多く含むことがあげられる。テフラに含まれる熱水変質鉱物については、近年に複数のレビュー(小坂, 2002; 大場, 2011)があるため、本論では簡単にふれることとする。

火山体内部で形成される熱水変質の種類は、火山体下の熱水変質の環境や発達程度を反映し、その鉱物の生成条件から熱水の組成や火山ガスの挙動などを解明することができる(小坂・平林, 1981; 小坂, 1982, 2003)。また、熱水性鉱床や地熱調査の知見とあわせることで、火山体下の熱水系の復元も可能である(大場, 2011; Minami et al., 2016)。火山体ないしその近傍で多数のボーリング試料が得られていると、爆発深度の推定など精緻な復元が可能となる(例えば、九重火山1995年噴火: 田口ほか, 1996; 有珠火山2000年噴火: 八幡, 2002)。このように熱水変質鉱物からは、水蒸気噴火の原因物質(火山ガスや熱水)や発生場の情報を得られるため、その解析は重要である。水蒸気噴火を繰り返すような火山からは、石英、クリストバライト、ハロイサイト、パイロフィライト、カオリン鉱物、みょうばん石、硬石膏、石膏などの鉱物組み合わせをもつ粘土質火山灰が噴出することが多い(Ohoba and Kitada, 2005)。その他、トリデマイト、スメクタイト、パーミキュライト、スメクタイトーイライト混合層鉱物、緑泥石、輝沸石、湯河原沸石、焼石膏、ダイアスポア、アナターゼ、紅柱石、黄鉄鉱、自然硫黄、カリ長石なども報告されている(大場, 2011)。

熱水変質鉱物の同定は、噴出物全体(ないしその細粒成分)を対象にXRDにより行われることが多い。しかし、近年では砂サイズ以上の変質岩片とよばれる粒子中の熱水変質鉱

物に対して、SEM-EDS 分析や microXRD を用いて変質鉱物の同定を行い、共存する鉱物の組み合わせや組成から変質の温度条件の推定なども行われている (Ohba et al., 2007, Minami et al., 2016). また熱水変質鉱物の組み合わせのみならず、水溶性付着成分分析、噴出物の色の定量、粒度、粒子構成物比、XRD、EPMA 分析など用いて、総合的に噴火発生場を推定する試みも行われている (宮城ほか, 2010). 国外の例では、ルアペフ火山のいくつかの噴火において、Christenson (2000), Christenson et al. (2010) が総合的な解析を基に噴火発生場の推定を行っている。噴出物中に含まれる熱水変質鉱物は、水蒸気噴火の発生した深度から地表間の様々な変質帯で形成されたものを含んでいる。そのため、これら研究のように様々な手法を用い総合的に解釈することが噴火の原因となった熱水系を理解するうえで重要である。

発生する現象とその性質

水蒸気噴火では、火口から弾道を描いて飛来する火山礫・火山岩塊サイズの投出岩塊や立ち昇った噴煙からもたらされる降下テフラ、比較的低温の火砕流や、直接火口から水 (温水) が溢れて発生するラハール (火口噴出型ラハール) などが発生する (Figs. 4A–4F). また、山体崩壊 (例えば, Yamamoto et al., 1999) や地すべり (例えば, 三宅・小坂, 1995; Procter et al., 2014) も伴うこともある。噴火毎に新たな火口形成を繰り返すことも多い。これら現象のうち、火砕流や火口噴出型ラハールは火口から離れた地点においても被害を及ぼすため、防災上注意すべき現象である。ここでは、このうち火口形成、降下テフラ、投出岩塊、火砕流および火口噴出型ラハールについて、最近 25 年ほどの研究例を中心にまとめる。なお、水蒸気噴火に伴い、溶融硫黄すなわち硫黄溶岩が火口から流れであることがあり、知床硫黄山 1936–37 年噴火など規模の大きなものも知られている (渡辺・下斗米, 1937). しかし、小規模な硫黄溶岩の流出は噴気活動の活発化によっても発生する (Fig. 4G および増淵, 2013) ため、本論では詳しくふれない。

1. 火口

水蒸気噴火では噴火毎に新たな火口が形成されることが多い。一般的には、水蒸気噴火で形成される火口径はマグマ噴火で形成されるものより小さい。火口径が爆発力に比例するとの考え (Sato and Taniguchi, 1997) に従うと、マグマ噴火より水蒸気噴火の方が爆発力は小さいことになる。

また、しばしば一回の噴火で複数の火口が形成され、それ

が列をなすことも多い。さらに、ある程度まとまった範囲に分布するが、噴火ごとに場所を変え新たな火口を形成する傾向がある。例えば、御嶽火山では、1979 年と 2014 年に新たな火口形成を伴う水蒸気噴火が発生したが、いずれの噴火も列状に並んだ複数の火口が形成された。また、両噴火の火口列は、近接しているが、異なる場所に形成された (Fig. 5). このような特徴は、噴火のたびに過熱水脈が地下浅所に貫入することで、水蒸気噴火が発生することを示唆している。同様に複数の火口が形成された例は、新潟焼山火山 1974 年噴火 (茅原ほか, 1977), 雌阿寒火山 1996, 2008 年噴火 (広瀬ほか, 2007a, b), 北海道駒ヶ岳火山 1996 年噴火 (宇井ほか, 1997) など多数ある。

2. 降下テフラ、投出 (放出) 岩塊

水蒸気噴火で発生する噴煙は、マグマ噴火に比べて熱量が小さいためか高度が低いことが多く、概ね火口上 2~3 km である。しかし、御嶽山 2014 年噴火のように火口上 7 km にも達したものもある。その噴煙からは、火口近傍には弾道を描いて飛んでくる火山岩塊とともに火山礫や火山灰が、遠方 (火口から約 2 km 以遠) には主に火山灰が降下テフラとしてもたらせられる。これら降下テフラの構成粒子の粒径は、マグマ噴火と異なり、シルトサイズ以下の細粒火山灰に富み、著しく不淘汰であることが特徴的である。しばしば粘土サイズの粒子の含有量は数 % を超える (小坂・小沢, 1966; 宇井ほか, 1997a; 廣瀬ほか, 2007a, b; Maeno et al., 2016). 粒径から予想される終端速度から考えると、現実的には落下し堆積するのが難しい粘土サイズの粒子が火口近傍にも堆積していることから、降下時に粒子の凝集が起きていたと考えられる (例えば, Maeno et al., 2016). 実際に、球形の凝集粒子 (凝集火山灰) の降下が観察されることは多い (例えば, 遠藤ほか, 2001; 及川ほか, 2017). なお、球形の凝集火山灰の生産は、湿った状態でつくられると考えられているため (例えば, Brown et al., 2012), 凝集火山灰は泥雨状に降下すると考えられていることが多い (例えば, 大場, 2011). しかし、御嶽山 2014 年噴火では、乾いた状態で球形の凝集粒子が降っていることが確認されている (Oikawa et al., 2016; 及川ほか, 2017). このように粒子の凝集と降下のタイミングは単純ではなく、まだ不明な点が多い。

Maeno et al. (2016) は、御嶽山の水蒸気噴火による降下テフラの分散をまとめ、層厚-面積ダイアグラム上で、水蒸気噴火は、それと同規模のブルカノ式などの小規模なマグマ噴火のものより遠方でのテフラの層厚が減じにくく、プリ

Fig. 4(→) Photographs (A–F) of phenomena associated with phreatic eruptions and (G) of a sulfur lava flow. (A) Phreatic eruption plume generated by the Ontake 2014 eruption. Black circles indicate ejected rock fragments. Photograph taken on September 27, 2014, by F. Kaito from Hachodarumi, Otaki Village (Nagano Prefecture, Japan). (B) Damage to the roofs of huts at the summit of Ontake Volcano (500 m northeast of the 2014 craters) caused by ejected rock fragments. Photograph captured on September 28, 2014, by T. Oikawa. (C) and (D) Pyroclastic flow generated by the Ontake 2014 eruption on September 27, 2014. Photographs taken by Y. Kadera from Ninoike-Honkan, Kiso Town (Nagano Prefecture, Japan). Black arrow in (C) indicates a ash cloud of pyroclastic flow. White arrow in (D) indicates a pyroclastic flow deposit. (E) Areal extent of pyroclastic flow deposits associated with the Ontake 2014 eruption. Photograph taken on September 28, 2014, by T. Oikawa. (F) Syneruptive-spouted type lahar generated by the Usu 2000 eruption. Photograph taken on April 9, 2000, by H. Okada. (G) Small sulfur lava at Oana crater of Azuma Volcano, NE Japan. Photograph taken in June 2015 by T. Oikawa.

Fig. 5. Craters formed by the 1979 and 2014 eruptions of the Ontake Volcano. The base topographic map is modified from the Chiriin Chizu, published by the Geospatial Information Authority of Japan.

二式噴火のものに似る特徴があることを明らかにした。他の噴火のデータも加えて分析した場合でも同様の傾向は認められる (Fig. 6)。水蒸気噴火の継続時間は、数〜数十分で終了するブルカノ式噴火と異なり、数時間から1日程度と長く、プリニー式噴火と比較的似ている。また、終端落下速度の遅い細粒火山灰を豊富に含むため、風の影響を受けやすく分散しやすいと推察される。テフラの分散パターンの類似は、これら特徴により、生じている可能性がある。

水蒸気噴火によって弾道を描いて飛来する火山岩塊、投出 (放出) 岩塊 (ejected rock fragment) は、マグマ噴火のもののように特徴的な形状とならないことから、火山弾とはよばれない。弾道火山岩塊 (Ballistic block) とよばれることもある。御嶽火山 2014 年噴火の例を出すまでもなく、投出岩塊による人的・物的被害は火口近傍で多く発生する (Figs. 4A, 4B)。しかし、その投出岩塊の分布やサイズ、投出速度などの詳しい記載は少なく、理解に乏しいのが現状である。水蒸気噴火による噴石などによる深刻な被害が及ぶ範囲は、火口近傍とされている (Barberi et al., 1992)。実際、焼岳火山 1962 年噴火 (Murai, 1962) や新潟焼岳火山 1974 年噴火 (茅原ほか, 1977) での投出岩塊の落下域は、火口から 1 km 以内の範囲に収まる。しかし、御嶽山 2014 年噴火では火口から 1.2 km ほど離れた地点にも長径 20~30 cm の投出岩塊が認められた (及川ほか, 2015; Kaneko et al., 2016)。また、ニュージーランドのトンガリロ火山 2012 年噴火では、火口から約 2.6 km まで投出岩塊が飛散したことが知られている (Fitzgerald et al., 2014; Breard et al., 2014)。そのため火口近傍といえども噴出源からの距離が 1 km を超える範囲にも投出岩塊の飛来は起こりうる。しかしその範囲は、ブルカノ式噴火での投出岩塊の最大到達距離 (約 4~6 km) より短距離である。その差を何が支配しているのかは明確ではない。単純なガス圧による爆発に比べて過熱水からフラッ

Fig. 6. Comparison of tephra thinning trends for representative eruptions. The solid and dashed gray lines denote subplinian and vulcanian eruptions, respectively. Data of phreatic eruptions (thick black lines) are from the following sources: O14, Ontake (2014); O79, Ontake (1979); Sh08, Shinmoedake (2008); Us00, Usu April 1–2, 2000; Ho96, Hokkaido Komagatake (1996); Me96 and Me98, Meakan (1996, 1998). Data are from Maeno et al. (2014), Geshi et al. (2010), Hiroce et al. (2007a), Takarada et al. (2001), and Ui et al. (1997a, b).

シュ蒸気の発生があるほうが爆発力は高くなる (Mayer et al., 2015) を考慮すると、ブルカノ式噴火のほうが投出岩塊の飛距離が長いのは、ガス圧による爆発に加えてマグマの発泡やそれに伴う急激な脱ガスなどによる投出岩塊の押し上げ効果が水蒸気噴火より大きいのかもかもしれない。

水蒸気噴火による投出岩塊の投出速度は、ニュージーランドにおけるまとめでは 30~200 m/s の間である (Browne and Lawless, 2001)。最近の解析例では、解析条件の差はあるが、トンガリロ火山 2012 年噴火で 200 m/s、御嶽山 2014 年噴火で 145–185 m/s と求まっている (Fitzgerald et al., 2014; Tsunematsu, et al., 2016)。

3. 低温火砕流

本論では、本質物の有無や温度の高低に関係なく、重力に引きずられて地形に沿って流れ下る火砕物の流れを火砕流とよび、火砕物密度 (重力) 流 (pyroclastic density current) と同義で使う。水蒸気噴火で比較的低温な火砕流が発生することは、多数の犠牲者をだした御嶽火山 2014 年噴火の発生 (山元, 2014; 及川ほか, 2015; Oikawa et al., 2016; Maeno et al., 2016) まで、広く認識されていなかった。しかし、蔵王火山 1886 年 (Miura et al., 2012)、磐梯火山 1888 年 (Yamamoto et al., 1999; 紺谷・谷口, 2003)、安達太良火山 1900 年噴火 (藤縄ほか, 2006)、十勝火山 1926 年 (上澤, 2008)、焼岳火山 1915 年 (及川, 2015)、西インド諸島グア

Fig. 7. Map showing the distribution of pyroclastic flow deposits associated with phreatic eruptions. (A) Bandai 1888 (Yamamoto et al., 1999), (B) Adataro 1900 (Itoh, 2016), (C) Tongariro Te Mari 2012 (Lube et al., 2016), and Ontake 2014 (Oikawa et al., 2016).

ドループのスフリエール火山 1976 年 (Sheridan, 1980), 御嶽火山 1979 年 (小林, 1979), トンガリロ火山 2012 年 (Breard et al., 2014; Lube et al., 2014) などの噴火で実例が認められている (Table 3, Figs. 4C–4E, 7). このうち、磐梯火山 1888 年噴火やトンガリロ火山 2012 年噴火では、山体崩壊による岩屑なだれを伴うような噴火であるが、いずれの火砕流も、岩屑なだれに伴うプラスト起源のものではなく、噴火によって直接発生した火砕流である。また、流れの上面から、流れが持っている熱により立ち登る噴煙も観察されている (例えば、山元, 2014)。このような観察結果から、高温のガスと噴出物が一体になって重力に引きずられ流れた現象と推定されるため、本質物は含まれていないが古典的な火砕流の概念も当てはまる。

これら水蒸気噴火で発生する火砕流がつくる堆積物は、地形的低所で層厚が厚くなるなどの傾向は認められるが (例えば、Yamamoto et al., 1999; Lube et al., 2014; Maeno et al., 2016)、明瞭なローブ状や段丘状の地形などは形成しないことから、比較的流れの中の粒子密度が低い流れからもたらされたと考えられる。しかし、一部の例外ではローブ状の堆積地形も観察されている (Sheridan, 1980) ことから、流れの中での粒子密度が比較的高く降伏強度の強い流れも発生している。両者の運搬・定置過程や流速・流走距離などは異

なると考えられるが、観察事例は少ないため、本論では分けずにまとめて議論する。

これら火砕流の堆積物は、いずれも淘汰が悪くシルトサイズ以下の細粒物を多く含む水蒸気噴火堆積物の特徴を示す (Yamamoto et al., 1999; Fujinawa et al., 2008; Miura et al., 2012; Lube et al., 2014; Maeno et al., 2016)。 $M_d-\sigma_p$ プロット (Waker, 1972) 上では通常のマグマ噴火の火砕流と異なる領域にしばしばプロットされる (Maeno et al., 2016)。しかし、おそらく流動時には細粒物は凝集していたと考えられるので、流動時の実際の粒度分布を復元することは難しい。その他の層相も低角の斜交ラミナの認められる場合 (例えば、Yamamoto et al., 1999; Miura et al., 2012) や塊状で顕著な堆積構造などが認められない場合 (例えば、Yamamoto et al., 1999; Miura et al., 2012; Maeno et al., 2016) など多様である。Fujinawa et al. (2008) は、水蒸気噴火に伴う火砕流堆積物の粒度や層相の特徴をまとめ、層相変化の多様性を整理している。しかし、降下テフラなど別の運搬・堆積様式で定置した水蒸気噴火テフラと類似した層相を示すものが多い。そのため、地層に残された層相のみからテフラ層を火砕流堆積物であると判別することは現状では難しい。

観察された水蒸気噴火で発生した火砕流堆積物の体積は 10^6 m^3 以下であり、 10^4 m^3 オーダのものが過半数である (Table 3)。到達距離は、火口から概ね 3 km 以内であるが、磐梯山 1888 年噴火のものは 6 km まで到達している。流れの流動しやすさの指標となる流走距離 (L) とその比高 (H) の比、 H/L は 0.2~0.5 程度である。この値は、マグマ噴火に伴って発生する比較的小規模な火砕流である火山岩塊火山灰流 (Block and ash flow) と同程度である (Fig. 8)。

流下速度が実測されたものは御嶽火山 2014 年噴火のみで、その値は 8~20 m/s である (山元, 2014)。その他、堆積物の粒度 (Lube et al., 2014; Maeno et al., 2016) やエナジーコーンモデル (Yamamoto et al., 1999) から流下速度の推定が行われているが、それは、24~100 m/s の範囲である (Table 3)。

流れの温度は、マグマ噴火の火砕流のように草木を焼け焦がすほど高温ではない。樹木の葉の発火限界温度は、常緑広葉樹で 455°C、落葉広葉樹で 407°C とされている (岩河, 1985)。そのため、火砕流の流下時の温度は 407~455°C よりも低温であるといえる。しかし、安達太良火山 1900 年噴火のように火傷による死傷者 (藤縄ほか, 2006; 伊藤, 2016) も出ているので、それほど低温でもない。推定されている火砕流の平均的な温度は、御嶽火山 2014 年噴火での山頂部では部分的に 100°C を超えた可能性はあるが概ね 30~100°C の範囲 (Oikawa et al., 2016)、トンガリロ火山 2012 年噴火では火口近傍では 64~100°C で遠方では 51~58°C (Efford et al., 2014) と推定されている。安達太良火山 1900 年噴火の例では草木が焦げなかったことから 400°C 以下で、火傷の被害があったことから 100°C はあったのではと考えられている (藤縄ほか, 2006)。いずれにしても最高温度は、100°C 程度である例が多いようである。な

Table 3. Details of pyroclastic flows (pyroclastic density currents) generated by phreatic eruptions.

Volcano	Eruption year	Deposition volume (m ³)	H/L	Area (km ²)	Ref.
Bandai	1888	~10 ⁵⁻⁶	0.2–0.3	13	Yamamoto et al.(1999)
Adatara	1990	1 × 10 ⁵	0.25	0.15	Fujinawa et al.(2006), Ito(2016)
Yakedake	1915	?	0.53	2.4	Oikawa(2015)
Tokachi	1926	7 × 10 ⁴	0.3	1.5	Uesawa(2008)
La Soufriere	1976	?	0.32–0.53	0.04	Sheridan(1980)
Te Marri (Tongariro)	2012	3.38 × 10 ⁵		6.1	Lube et al.(2014)
Ontake	2014	7.2 × 10 ⁴	0.45–0.5	4.4	Yamamoto(2014), Maeno et al.(2016)

Fig. 8. Comparison of relative - high (H) vs flow length (L). Data are from Freundt et al. (2000) and references therein (see Table 3).

お、マグマ噴火で発生する高温の火砕流でも必ずしも被害がでるような規模の融雪型ラハールが引き起こされないことを考慮すると、より低温な水蒸気噴火に伴う火砕流による融雪型ラハールは、発生するにしても、被害がでるような規模のものはきわめて希であると考えられる。

これら火砕流は、一般的には横方向の噴出により発生すると多くの場合は考えられている(例えば, Lube et al., 2014)。しかし, Yamamoto et al.(1999)は、磐梯火山 1888 年噴火の火砕流の発生過程を考察し、水蒸気噴火によって発生する噴煙はマグマ噴火の噴煙に比べて浮力に欠け崩壊しやすいことを指摘した。そのため水蒸気噴火において噴煙柱崩壊型火砕流は発生しやすく、その条件は噴煙の温度が比較的低く、

多量の岩片が含まれることを示した。そのような性質を基に、山元(2014)では、水蒸気噴火での噴煙柱崩壊型火砕流の発生は、新火口の開口時に発生しやすいことを指摘している。実際、御嶽火山 2014 年噴火では、多数の目撃証言と映像を基に噴煙柱が崩壊して火砕流が発生したことが明らかにされ、その発生のタイミングも新たな火口の開口直後であることが示された(Oikawa et al., 2016)。他の噴火の事例でも、新たな火口形成を伴う噴火の初期に火砕流が発生している。直接の観察事例が少ないことから、まだ議論の余地は残るが、水蒸気噴火で発生する火砕流の主要な原因は、噴煙柱崩壊である可能性が高いだろう。

4. 火口噴出(溢流)型ラハール

水蒸気噴火の発生とほぼ同時に、火口ないし火山体内から泥質分を含む水(しばしば温水)が流れ出てラハールを発生することがある(Fig. 4F)。このようなラハールは焼岳火山 1962 年噴火の際に詳しく観察され(Yamada, 1962; 小坂・小沢, 1966)、注目されるようになった。本論では、そのようなラハールを火口噴出(溢流)型ラハール(syneruptive-spouted type lahar)とよぶ。

ラハールは、火山地域で発生する概ね水に飽和した土砂の流れをさす言葉で、しばしば火山泥流と同義の意味で使用され、特に火山防災の場では、後述の一次ラハールを火山泥流とすることが多い。しかし、ラハールは様々な運搬メカニズムを持つ流れの総称であることから、必ずしも泥質分に富む泥流状の流れをさすわけではない(例えば, Smith, 1986; 山元, 1998)。そのため本論では、火山泥流を使用せずにラハールの語を使用し、それによってもたらされた堆積物をラハール堆積物とよぶ。また、ラハールは、噴火とほぼ同時に発生する一次ラハールと、その後の降雨など影響で、火砕物が二次的に移動する二次ラハールに分けられる(例えば, Vallance and Iverson, 2015)。ここで扱う火口噴出(溢流)型ラハールは、一次ラハールに分類される。

火口から直接ラハールが流れ出る火口噴出型ラハールの観察例は、焼岳火山 1962 年噴火の後に、国内の火山では新潟焼山火山 1974 年(茅原ほか, 1977)、御嶽火山 1979 年(小林, 1979)、霧島火山新燃岳 1992 年(地震研究所・九州大学, 1992)、九重火山 1995 年(星住ほか, 1996)、秋田焼山火山 1997 年(林ほか, 1997; Ohba et al., 2007)、有珠火山 2000

Table 4. Characteristics of syneruptive-spouted lahar flows triggered by phreatic eruptions.

Volcano	Eruption year	Lahar (debris flow part) deposit volume	H/L **	mud wt. %	Ref.
(m ³)					
Meakan	2006*	total 4.0 × 10 ²	0.3 0.4	40–50	Hirose et al.(2007), Sasaki et al.(2006)
Tokachi	1926	?			Uesawa (2008)
Usu	1910	6.2 × 10 ³	0.1		Sato(1910), Oinoue(1913)
Usu	1943–45	?			Tanakadate et al.(1944), Mimatsu(1995)
Usu	2000	1.0 × 10 ⁵	0.2	15	Mizugaki et al.(2001), Sasaki et al.(2016)
Akita–Yakeyama	1997	2.0 × 10 ³	0.2		Hayashi et al.(1997), Ohba et al.(2007)
Chokai	1974*	total 3.0 × 10 ⁴			Ui and Shibahashi(1975)
Kurikoma	1744	?			Oikawa(2012)
Kurikoma	1944	?			Doi(2006), Oikawa(2012)
Nikko–Shirane	1873*	?	0.1		Oikawa(2016b)
Nikko–Shirane	1889	?			Oikawa(2016b)
Nikko–Shirane	1890	?			Oikawa(2016b)
Niigata–Yakeyama	1949	?			Hoshiba et al.(2017)
Niigata–Yakeyama	1974	1.3 × 10 ⁵	0.1		Chihara et al.(1977)
Yakedake	1915	?	0.3		Oikawa(2015)
Yakedake	1962	?	0.2	14–27	Yamada(1962)
Ontake	1979	?			Kobayashi(1979)
Ontake	2014	1.2 × 10 ⁵	0.3		Sasaki et al.(2016)
Hakone	2015	?			Mannen(2016)
Kuju	1995	?	0.3		Hoshizumi et al.(1996)
Shinmoedake (Kirisima)	1992	4.0 × 10 ¹	0.4		Earthqua Res. and Kyoto Univ.(1992), Sasaki et al.(2016)
Shinmoedake (Kirisima)	1822	?	?		Oikawa et al.(2012)
Io Yama (Kirishima)	1768	?	?		Tajima et al.(2013)
Te Marri (Tongariro)	2012	7.0 × 10 ⁵	0.1		Procter et al. (2014)

* including melting snow

** this study

年(水垣ほか, 2001), 雌阿寒岳火山 2006 年(佐々木ほか, 2006; 廣瀬ほか, 2007c), 御嶽火山 2014 年(Kaneko et al., 2016; Oikawa et al., 2016; Sasaki et al., 2016), 箱根火山 2015 年(萬年, 2015)などの噴火で観察されている。国内の火山では, 焼岳 1962 年噴火以前のものも含めるとさらに多数の火山で確認されており (Table 4), 国外でもトンガリロ火山 2012 年 8 月 6 日噴火で確認されている (Procter et al., 2014)。Table 4 を参照すると, 同じ火山で繰り返し発生する傾向が認められる。このように事例は多く確認されているが, 詳しい記載が行われているものはそれほど多くない。現時点で明らかになっている特徴を以下にまとめる。

火口噴出型ラハールは, 比較的火口付近に限定的に認められる, 粒子濃度の高い濃密な流れからなると考えられる土石流部 (debris flow part) と, より粒子濃度が低い泥水部 (muddy water part) に分けられる。なお, Sasaki et al. (2016) では, 土石流部をラハール部とよんでいる。

土石流部由来の堆積物 (以後, 土石流堆積物とよぶ) は, 断面が上に凸型のしばしばロープ状の地形を形成する (Yamada, 1962; 廣瀬ほか, 2007c; Procter et al., 2014; Sasaki et al., 2016)。トンガリロ火山においては, 溶岩しわに類似する微地形が上面に観察された (Procter et al., 2014)。つまり土石流部は降伏強度の強い流れとして流下・定置したと判断される。その一方, 泥水部は顕著な堆積地形を残さない。

地形が形成されたとしても層厚が薄く分布も局所的であり, 後の降雨や増水によって失われてしまうことが多いため, 詳しい記載に乏しい。土石流部が形成したロープ状地形のさらに下流側に泥水の流れが認められたり (Sasaki et al., 2016), 噴火直後に形成されたロープ地形の上を, 泥水がながれた痕跡が認められたり (廣瀬ほか, 2007c) することから, 土石流の先端や後ろに泥水部が伴っていると考えられる。なお, 泥水部による河川の濁りや水質の変化によって, 下流の施設に影響がでることがある (例えば, 土井, 2006) ため, 流域河川沿いの施設は防災上の注意が必要である。

土石流堆積物は, 泥質分に富む基質中に, 砂から礫サイズまで様々な粒度の粒子を含む不淘汰な堆積物であり, 顕著な堆積構造は認められない (塊状の) 堆積物である (小坂・小沢, 1966; 水垣ほか, 2001; 廣瀬ほか, 2007c; Procter et al., 2014; Sasaki et al., 2016)。堆積物は, 給源から遠方相まで粒度組成や層相変化に乏しい特徴をもつ (小坂・小沢, 1966; 廣瀬ほか, 2007c)。シルトサイズ以下の泥質分の割合は, 全粒度組成中の 15~60% 程度であり, 粘土分も 5~15% 程度になる (小坂・小沢, 1966; 水垣ほか, 2001; 廣瀬ほか, 2007c; Sasaki et al., 2016)。これらの特徴は, 粘性土石流 (cohesive debris flow: Scott et al., 1995; Vallance and Scott, 1997) 堆積物の特徴を示す。

泥水部の見積もりが地質学的には難しいため, 火口噴出型

ラハールの総噴出量(体積)は不明である。しかし、土石流堆積物については、Table 4 のように求められている。確認されたもので最大規模のものは 10^5 m^3 オーダである。土石流堆積物の流下距離(L)とその比高(H)の比 H/L は 0.1~0.4 であり、0.1~0.3 程度が多い(Table 4)。これは火山岩塊火山灰流(Block and ash flow)の値よりやや小さく、大規模なラハール堆積物や火砕流堆積物と同定度ないしやや大きいものが多い。

土石流部の流下速度の実測値は、雌阿寒岳 2006 年噴火の例(稲葉ほか, 2006)のみである。それによると、流下速度は 0.01~1.0 m/sec の間であり、平均流下速度は 0.025 m/sec (平均斜度: 34.7°)と比較的遅い。流動性は比較的高いが、平均流下速度は遅いといった特徴があるのかもしれない。粘土鉱物と水の混合液はチキソトロピー性を有することが知られている(梅屋ほか, 1972; 山田, 1982)。そのチキソトロピー性によって、流れの中のせん断力が強くなると粘度が高くなるため流速の早い流れはつくれないのかもしれない。

なお、火口噴出型ラハールに含まれる液相の水は、しばしば温水であることが確認されている(Yamada, 1962; 水垣ほか, 2001; 廣瀬ほか, 2007c)。それゆえ、積雪時にはラハール流下域で融雪が発生する可能性がある。例えば、日光白根火山の 1873 年 3 月 12 日に発生した火口噴出型ラハールは、積雪期に発生したためか、21 km も流れ下る大規模なものであった(Table 4)。実際に融雪が起きて大規模になるかは防災上重要な問題であるため、事例の収集、融雪条件・過程を解明するための実験や理論的な解析などを今後行う必要がある。

火口噴出型ラハールの堆積物は粘土分に富むが、その粘土を構成する粘土鉱物は熱水変質で生成されたものである(小坂・小沢, 1966; Ohba et al., 2007; 廣瀬ほか, 2007c; Sasaki et al., 2016)。小坂・小沢(1966)は、地下で熱水変質により形成された粘土鉱物に富むこと、温水と共に噴出したことなどから、地下に熱水変質粘土を多量に含む“泥漿溜り”が存在し、それが噴出することで火口噴出型ラハールが発生したと考えた。前述のように、水蒸気噴火の主な発生メカニズムの一つとして、過熱水からのフラッシュ蒸気の発生とその急膨張によるものがあげられる。過熱水からのフラッシュ蒸気の発生率を考えると、すべての過熱水がフラッシュ蒸気になるわけではないことから、フラッシュ蒸気になりきらない熱水が火口から溢れ出る可能性は十分ある。さらに、火山ガス放出量の増大により発生した水蒸気噴火の場合も、火山ガスが直接液体の水を吹き飛ばしたり、気泡の上昇で液体が運ばれるエアリフトの効果によって火口から水があふれだしたりする可能性がある。このように火口噴出型ラハールの発生原因は、二つのタイプのメカニズムが考えられるが、両タイプのメカニズムの区別は噴出物の粒度組成(投出岩塊を伴うかどうか)や、変質鉱物の違い(火道周辺の酸性変質物由来のもののみか否か)などに現れるかもしれない。

まとめと今後の展開

水蒸気噴火は、噴出物中に本質物を含まない、主に過熱水

が水蒸気に相転移することで発生する噴火である。その噴火は、総噴出物率が 10^8 m^3 以下の規模であり、熱水変質鉱物を多く含み、しばしば粘土サイズの粒子に富む不淘汰な噴出物を放出する。一回の噴火の継続時間は数時間から 1 日程度である。その一方、同程度の規模の噴火を数~数十年の間に間をおいて複数回繰り返すこともある。そのような活動の詳しい記載例は少なく、その発生機構などは未解明の部分が多い。また、水蒸気噴火からマグマ噴火に移行することもあるが、その頻度は、水蒸気噴火全体の 1 割程度である。水蒸気噴火で発生する噴火現象は、降下テフラや投出岩塊の放出や、比較的低温(多くの場合 100°C 程度)な火砕流や火口噴出型ラハールなどである。投出岩塊は火口近傍(多くの場合、1 km 以内)に落下するが、火砕流や火口噴出型ラハールは、火口から数 km も離れたところまで達するので防災上注意が必要である。

このように、水蒸気噴火の性質がかなり明らかになってきた。しかし、1 回の噴火ないし 1 回の活動期に相当する水蒸気噴火の推移やその準備過程については、具体的な記載例が少ないのが現状である。さらに、噴火のプロセスの解明も、近年始まったばかりである。また、投出岩塊や火砕流、火口噴出型ラハールの詳細な記載も少ない。特に火砕流と火口噴出型ラハールについては、噴出物の層相からそれらを認識できるようにすることが課題である。その他、火山体の熱水系の発達と噴火との関係なども、まだ未解明な部分も多い。水蒸気噴火の理解は、火山防災的に重要であるばかりではなく、火山体内の熱水系の発達過程など、火山の熱活動の発達過程についても有益な情報が与えられると考えられる。そのため今後の研究の進展が、ますます望まれる。

謝 辞

本論をまとめるきっかけは、北海道大学教授の中川光弘さんに与えていただいた。火山噴火予知連絡会の御嶽山総合観測班山頂調査チームに参加された方々との調査および議論は、本論をまとめるうえで参考となった。本論をまとめるにあたって、科研費課題番号 15K01245(代表: 藤縄)を使用した。また、北海道大学名誉教授の岡田 弘さんや、小寺祐介さん、垣外富士男さんには写真を提供していただいた。査読者の山形大学教授の伴 雅雄さん、産業技術総合研究所活断層・火山研究部門副部門長の伊藤順一さんの指摘によって本稿は改善された。また、編集担当の茨城大学准教授の長谷川 健さんにもお世話になった。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Abbasi, T. and Abbasi, S. A., 2007, The boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): mechanism, consequence assessment, management. *Jour. Hazard. Mater.*, **141**, 489–519.
- Barberi, F., Bertagnini, A., Landi, P. and Principe, C., 1992, A review on phreatic eruptions and their precursors. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **52**, 231–246.
- Bates, R. and Jackson, J., 1987, *Glossary of Geology*. American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 788p.

- Breard, E. C. P., Lube, G., Cronin, S. J., Fitzgerald, R., Kennedy, B., Scheu, B.,...Moebis, A., 2014, Using the spatial distribution and lithology of ballistic blocks to interpret eruption sequence and dynamics: August 6, 2012 Upper Te Maari eruption, New Zealand. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 373–386.
- Brown, R. J., Bonadonna, C. and Durant, A. J., 2012, A review of volcanic ash aggregation. *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C*, **45-46**, 65–78.
- Browne, P. R. L. and Lawless, J. V., 2001, Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth Sci. Rev.*, **52**, 99–331.
- 千木良雅弘・田中和弘(Chigira, M. and Tanaka, K.), 1997, 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴(Structural features and the history of mud volcanoes in southern Hokkaido, northern Japan). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **103**, 781–791.
- 茅原一也・鈴木光剛・小林一三(Chihara, K., Suzuki, M. and Kobayashi, K.), 1977, 1974 年新潟焼山火山の爆発に伴う土石流(On the earth flow caused by the 1974 eruption of Yakeyama Volcano). 新潟大学地盤災害研究所年報(*Annu. Rep. Res. Lab. Ground Failure*), **3**, 1–15.
- Christenson, B. W., 2000, Geochemistry of fluids associated with the 1995–1996 eruption of Mt. Ruapehu, New Zealand: signatures and processes in the magmatic-hydrothermal system. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **97**, 1–30.
- Christenson, B. W., Reyes, A. G., Young, R., Moebis, A., Sherburn, S., Cole-Baker, J. and Britten, K., 2010, Cyclic processes and factors leading to phreatic eruption events: Insights from the 25 September 2007 eruption through Ruapehu Crater Lake, New Zealand. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **191**, 15–32.
- 土井宣夫(Doi, N.), 2006, 栗駒火山の 1944 年噴火と水蒸気爆発について(1944 eruption and phreatic eruption of Kurikoma Volcano)*. 岩手の地学(*Iwate no Chigaku*), **35-36**, 3–39.
- Efford, J. T., Bylsma, R. J., Clarkson, B. D. and Pittari, A., 2014, Vegetation dieback as a proxy for temperature within a wet pyroclastic density current: A novel experiment and observations from the 6th of August 2012 Tongariro eruption. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 367–372.
- 遠藤邦彦(Endo, K.), 1985, 白山火山地域の火山灰と泥炭層の形成過程(Volcanic ash peat beds forming process of the Haku-san Volcano area)*. 白山高山帯自然史調査報告書(*Natl. Hist. Res. Rep. Alpine Area in Haku-san*), 11–30.
- 遠藤邦彦・小林哲夫(Endo, K. and Kobayashi, T.), 2012, フィールドジオロジー 9 第四紀(*Field Geology 9, Quaternary*)*. 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 231p.
- 遠藤邦彦・大野希一・国方まり・諸星真帆・鈴木正章・西村裕一..... 陶野郁雄(Endo, K., Ohno, M., Kunikata, M., Morohoshi, M., Suzuki, M., Nishimura, Y.,...Tohno, I.), 2001, 有珠山 2000 年噴火におけるマグマ水蒸気爆発(Phreatomagmatic explosions of the 2000 Eruption of Usu Volcano). 日本大学文学部自然科学研究所研究紀要(*Proc. Inst. Natl. Sci., Nihon Univ.*), **36**, 65–73.
- Fitzgerald, R. H., Tsunematsu, K., Kennedy, B. M., Breard, E. C. P., Lube G., Wilson, T. M.,...Cronin, S. J., 2014, The application of a calibrated 3D ballistic trajectory model to ballistic hazard assessments at Upper Te Maari, Tongariro. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 248–262.
- Freundt, A., Wilson, C. J. N. and Carey, S. N., 2000, Ignimbrites and block-ash-flow deposits. In Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H. and Stix, J., eds., *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, London, 581–599.
- Fujinawa, A., Ban, M., Ohba, T., Kontani, K. and Miura, K., 2008, Characterization of low-temperature pyroclastic surges that occurred in the northeastern Japan arc during late 19th century. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 113–130.
- 藤縄明彦・巖崎正幸・本田恭子・長尾明美・和知剛・林信太郎(Fujinawa, A., Iwasaki, M., Honda, K., Nagao, A., Wachi, T. and Hayashi, S.), 2004, 秋田駒ヶ岳火山, 後カルデラ活動期における噴火史: 火山体構成噴出物と降下テフラ層の対比(Eruption history in the post-caldera stage of Akita-Komagatake Volcano, Northeastern Japan Arc: Correlation between eruptives constituting volcanic edifices and air-fall tephra layers). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **49**, 333–354.
- 藤縄明彦・鴨志田毅・棚瀬充史・谷本一樹・中村洋一・紺谷和生(Fujinawa, A., Kamoshida, T., Tanase, A., Tanimoto, K., Nakamura, Y. and Kontani, K.), 2006, 安達太良火山, 1900 年爆発的噴火の再検討(Reconsideration of the 1900 Explosive Eruption at Adatara Volcano, Northeastern Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 311–332.
- 藤沢康弘・奥野 充・中村俊夫・小林哲夫(Fujisawa, Y., Okuno, M., Nakamura, T. and Kobayashi, T.), 2002, 九州北東部, 鶴見火山の最近 3 万年間の噴火活動(Eruptive activities of Tsurumi volcano in Japan during the past 30,000 years). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **108**, 48–58.
- 藤原伸也・中川光弘・長谷川摂夫・小松大祐(Fujiwara, S., Nakagawa, M., Hasegawa, S. and Komatsu, D.), 2007, 北海道中央部, 十勝岳火山の最近 3,300 年間の噴火(Eruptive history of Tokachi-dake Volcano during the last 3,300 years, central Hokkaido, Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **52**, 253–271.
- Geshi, N., Iguchi, M. and Shinohara, H., 2016, Phreatomagmatic eruptions of 2014 and 2015 in Kuchinoerabujima Volcano triggered by a shallow intrusion of magma. *Jour. Natl. Disas. Sci.*, **37**, 67–78.
- 下司信夫・小林哲夫(Geshi, N. and Kobayashi, T.), 2006, 鹿児島県永良部島火山最近約 3 万年間の噴火活動(Volcanic activities of Kuchinoerabujima Volcano within the last 30,000 years). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 1–20.
- 下司信夫・宝田晋治・筒井正明・森 健彦・小林哲夫(Geshi, N., Takarada, S., Tsutsui, M., Mori, K. and Kobayashi, T.), 2010, 霧島火山新燃岳 2008 年 8 月 22 日噴火の噴出物(Products of the August 22, 2008 eruption of Shinmoedake Volcano, Kirishima Volcanic Group, Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **55**, 53–64.
- Goto, Y., Toriguchi, Y., Sasaki, H. and Hatakeyama, A., 2015, Multiple vent-forming phreatic eruptions after AD 1663 in the Noboribetsu Geothermal Field, Kuttara Volcano, Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **60**, 241–249.
- 長谷川 健・中川光弘・宮城磯治(Hasegawa, T., Mitsuhiro Nakagawa, M. and Miyagi, I.), 2017, 北海道東部, アトサヌプリ火山における水蒸気噴火の発生履歴: 炭素年代および気象庁ボーリングコアからの検討(Re-evaluation of the history of phreatic eruptions from Atosanupuri Volcano, eastern Hokkaido, Japan: Inferred from ¹⁴C ages and borehole cores of Japan Meteorological Agency). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **123**, 269–281.
- 早川由紀夫(Hayakawa, Y.), 1993, 噴火マグニチュードの提唱(A Proposal of Eruption Magnitude Scale). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **38**, 223–226.
- 林 信太郎・伊藤英之・千葉達朗(Hayashi, S., Itoh, H. and Chiba, T.), 1997, 1997 年 8 月 16 日秋田焼山火山の水蒸気爆発(速報)(16th August 1997 phreatic explosion of Akita-Yakeyama volcano, northeast Japan). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **103**, XXVII–XXVIII.
- Hedenquist, J. W. and Henley, R. W., 1985, Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: their origin, associated breccia, and relation to precious metal mineralization. *Econ. Geol.*, **80**, 1640–1668.
- 廣瀬 亘・中川光弘・宝田晋治・吉田真理夫・岡崎紀俊・石丸 聡..... 宇井忠英(Hirose, W., Nakagawa, M., Takarada, S., Yoshida, M., Okazaki, N., Ishimaru, S.,...Ui, T.), 2007a, 1996 年(平成 8 年)11 月および 1998 年(平成 10 年)11 月に発生した雌阿寒岳噴火(November 1996 & November 1998 eruptions at Meakandake Volcano, eastern Hokkaido, Japan). 北海道立

- 地質研究所報告 (*Rep. Geol. Surv. Hokkaido*), **78**, 21–35.
- 廣瀬 亘・岡崎紀俊・石丸 聡・長谷川健・藤原伸也・中川光弘……釧路地方気象台 (Hirose, W., Okazaki, N., Ishimaru, S., Hasegawa, K., Fujiwara, S., Nakagawa, M.,...Kushiro Local Meteorol. Office), 2007b, 2006 年 (平成 18 年) 3 月の雌阿寒岳噴火: 噴火の経過および降灰調査結果 (The eruption on March 2006 at Meakandake volcano, Hokkaido, northern Japan: eruption process and ash fall survey). 北海道立地質研究所報告 (*Rep. Geol. Surv. Hokkaido*), **78**, 37–55.
- 廣瀬 亘・岡崎紀俊・石丸 聡・田近 淳・高橋浩晃 (Hirose, W., Okazaki, N., Ishimaru, S., Tajika, J. and Takahashi, H.), 2007c, 2006 年 (平成 18 年) 3 月の雌阿寒岳噴火で発生した泥流とその堆積物 (Mudflow and its deposits occurred by the eruption on March 2006 at Meakandake volcano, Hokkaido, northern Japan). 北海道立地質研究所報告 (*Rep. Geol. Surv. Hokkaido*), **78**, 57–81.
- 干場三寛・重野伸昭・小林 修・高橋 博・舟崎 淳・及川輝樹・早津賢二 (Hoshiba, M., Shigeno, N., Kobayashi, O., Takahashi, H., Funasaki, J., Oikawa, T. and Hayatsu, K.), 2017, 新潟焼山の昭和初期の噴気活動および 1949 年の噴火記録の再検討 (On the fumarolic activities of Niigata-Yakeyama in early Showa era, and the review of 1949 eruption). 地球惑星連合大会 2017 年講演要旨 (*JPGU Meet. 2017 Abstr.*), SVC47–P13.
- 星住英夫・川辺慎久・鎌田浩毅・斎藤英二 (Hoshizumi, H., Kawanabe, Y., Kamata, H. and Saito, E.), 1995, 九重火山 1995 年 10 月の噴火とその堆積物 (October 1995 eruption and its deposit of Kuju Volcano)*. 地質ニュース (*Chisitsu News*), **498**, 33–35.
- 稲葉千秋・佐々木 寿・矢野政博・岡田 弘 (Inaba, C., Sasaki, H., Yano, M. and Okada, H.), 2006, 監視カメラ映像に見る雌阿寒岳 2006 年 3 月 21 日噴火 (The Eruption of Meakandake Volcano on March 21, 2006 by image of the monitoring camera). 日本火山学会 2006 年講演予稿集 (*2006 Fall. Meet. Volcanol. Soc. Japan, Abstr.*), 109–109.
- 石毛康介・中川光弘 (Ishige, K. and Nakagawa, M.), 2017, 北海道中央部, 大雪火山群, 旭岳サブグループの後期更新世～完新世火山活動史 (Late Pleistocene-Holocene volcanic history of Asahidake subgroup of Taisetsu volcano group, central Hokkaido, Japan). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **123**, 73–91.
- 石丸 聡・田村 慎・廣瀬 亘・村山泰司・岡崎紀俊・柴田智郎……網走地方気象台 (Ishimaru, S., Tamura, M., Hirose, W., Murayama, Y., Okazaki, N., Shibata, T.,...Abashiri Local Meteorol. Office), 2009, 2008 年 11 月に噴火した雌阿寒岳の調査報告 (Preliminary report on the eruption on November 2008 of Meakandake volcano). 北海道立地質研究所報告 (*Rep. Geol. Surv. Hokkaido*), **80**, 115–126.
- 石崎泰男・森田考美・岡村裕子・小池一馬・宮本亜里沙・及川輝樹 (Ishizaki, Y., Morita, T., Okamura, Y., Koike, K., Miyamoto, A. and Oikawa, T.), 2014, 男体火山の最近 17,000 年間の噴火史 (History of Nantai Volcano During the Last 17,000 Years). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **59**, 185–205.
- Ishizaki, Y., Oikawa, T. and Okamura, Y., 2010, AMS ^{14}C dating of lacustrine and pyroclastic deposits in the summit crater of Nantai volcano, NE Japan: Evidence for Holocene eruption. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **105**, 215–227.
- 伊藤順一 (Itoh, J.), 1999, 西岩手火山において有史時代に発生した水蒸気爆発の噴火過程とその年代 (Eruption Sequence and ^{14}C Age of Phreatic Eruptions Occurred at West-Iwate Volcano in Historic Age). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **44**, 261–266.
- 伊藤順一 (Itoh, J.), 2016, 水蒸気噴火による“低温”火砕流の人的被害の発生条件 (Occurrence condition for human body damage caused by the pyroclastic density current induced by phreatic eruption). 火山学会 2016 年講演予稿集 (*2016 Fall Meet. Volcanol. Soc. Japan, Abstr.*), 69–69.
- 伊藤順一・星住英夫・川辺慎久 (Itoh, J., Hoshizumi, H. and Kawanabe, Y.), 2014, 最近 5000 年間の九重火山における水蒸気噴火の発生履歴 (Eruptive History of Phreatic Activity of Kuju Volcano during the Recent 5,000 Years). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **59**, 241–254.
- 伊藤英之・早津賢二・鈴木浩二 (Ito, H., Hayatsu, K. and Suzuki, K.), 2000, 新潟焼山 1997 年～1998 年の小規模噴火活動 (Small Scale Eruptions of Niigata-Yakeyama Volcano 1997–1998). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **45**, 181–186.
- 地震研究所, 京大理学部 (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo and Kyoto University), 1992, 霧島火山群・新燃岳の活動 (その 2)-1992 年 3 月～5 月 (The Volcanic activity of Shinmoedake, Kirishima Volcanoes: Part 2)*. 火山噴火予知連絡会会報 (*Rep. Coord. Comm. Predict. Volcan. Erupt.*), **53**, 81–93.
- Kato, A., Terakawa, T., Yamanaka, Y., Maeda, Y., Horikawa, S., Matsuhira, K. and Okuda, T., 2015, Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan. *Earth Planets Space*, **67**, doi: 10.1186/s40623-015-0288-x
- Kaneko, T., Maeno, F. and Nakada, S., 2016, 2014 Mount Ontake eruption: Characteristics of the phreatic eruption as inferred from aerial observations. *Earth Planets Space*, **68**, doi: 10.1186/s40623-016-0452-y
- 紺谷和生・谷口宏充 (Kontani, K. and Taniguchi, H.), 2003, 磐梯山 1888 年噴火によるサージ堆積物と被災記録 (Surge Deposits and Disaster Record induced by Mt. Bandai 1888 Eruption). 東北アジア研究 (*Northeast Asian Studies*), **8**, 71–90.
- 工藤 崇・奥野 充・中村俊夫 (Kudo, T., Okuno, M. and Nakamura, T.), 2003, 北八甲田火山群における最近 6000 年間の噴火活動 (Eruptive history of Kita-Hakkoda volcanic group during the last 6000 years, Northeast Japan). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **109**, 151–165.
- 工藤 崇・奥野 充・大場 司・北出優樹・中村俊夫 (Kudo, T., Okuno, M., Ohba, T., Kitade, Y. and Nakamura, T.), 2000, 北八甲田火山群, 地獄沼起源の噴火堆積物—噴火様式・規模・年代 (The Eruptive Products from Jigoku-numa Hot Pool in Kita-Hakkoda Volcano Group, Northeast Japan: Eruption Style, Magnitude and Age). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **45**, 315–322.
- 久野 久 (Kuno, H.), 1952, 火山及び火山岩 (*Volcano and Volcanic Rocks*)*. 岩波全書 (Iwanami Publ.), 255p.
- 小林 淳・萬年一剛・奥野 充・袴田和夫 (Kobayashi, M., Mannen, K., Okuno, M., Nakamura, T. and Hakamata, K.), 2006, 箱根火山大涌谷テフラ群: 最新マグマ噴火後の水蒸気爆発堆積物 (The Owakidani Tephra Group: A Newly Discovered Post-magmatic Eruption Product of Hakone Volcano, Japan). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 245–256.
- 小林武彦 (Kobayashi T.), 1979, 1979 年御岳山火山活動 (1979 Eruption of Ontake Volcano, Central Japan). 地球科学 (*Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*), **33**, ii–iib.
- 小林武彦 (Koayashi, T.), 1980, 御岳山 1979 年火山活動 (The 1979 Eruption of Ontake Volcano*), 御岳山 1979 年火山活動および災害の調査研究報告 (*Disas. Res. Rep. Otake Volcano 1979 Eruption*)*, 4–12.
- 小林武彦・守屋以智雄・早津賢二・東野外志男 (Kobayashi, T., Moriya, I., Hayatsu, K. and Higashino, T.), 1982, 中部地方の諸火山の沖積世小規模噴火 (Small-scaled eruptions in Holocene of some volcanoes in central Japan (abs.)). 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **27**, 333–333.
- Lube, G., Breard, E. C. P., Cronin, S. J., Procter, J. N., Brenn, M., Moebis, A.,...Fournier, N., 2014, Dynamics of surges generated by hydrothermal blasts during the 6 August 2012 Te Maari eruption, Mt. Tongariro, New Zealand. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 348–366.
- Maeno, F., Nakada, S., Oikawa, T., Yoshimoto, M., Komori, J., Ishizuka, Y.,...Nagai, M., 2016, Reconstruction of a phreatic eruption on 27 September 2014 at Ontake Central Japan, based on proximal pyroclastic density current and fallout

- deposits. *Earth Planets Space*, **68**, doi: 10.1186/s40623-016-0449-6
- 前野 深・鈴木由希・中田節也・小山悦郎・金子隆之・藤井敏嗣.....
長井雅史(Maeno, F., Suzuki, Y., Nakada, S., Koyama, E., Kaneko, T., Fujii, T.,...Nagai, M.), 2010, 浅間山 2009 年 2 月 2 日噴火の経緯と噴出物(Course and Ejecta of the Eruption of Asama Volcano on 2 February 2009). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **55**, 147–154.
- 萬年一剛(Mannen, K.), 2016, 箱根火山の観測・研究と 2015 年噴火(*The 2015 Eruption of Hakone Volcano*)*. 地質と調査(*Chisitsu to Chosa*), **1**, 26–31.
- Marini, L., Principe, C., Chiodini, G., Cioni, R., Fytikas, M., Marinelli, G., 1993, Hydrothermal eruptions of Nisyros (Dodecanese, Greece). Past events and present hazard. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **56**, 71–94.
- 増淵佳子(Masubuchi, Y.), 2013, 富山県立山地獄谷で 2010 年 5 月に発生した硫黄溶岩の記載岩石学的特徴(Field occurrence and petrological characteristics of sulfur lava flow formed in May 2010 in Jigokudani, Tateyama Volcano). 富山市科学博研報(*Bull. Toyama Sci. Mus.*), **36**, 1–10.
- Mayer, K., Scheu, B., Gilg, H. A., Heap, M. J., Kennedy, B. K., Lavalle, Y.,...Dingwell, D. B., 2015, Experimental constraints on phreatic eruption processes at Whakaari (White Island volcano). *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **302**, 150–162.
- 三松正夫(Mimatsu, M.), 1995, *Showa-Shinzan Diary*. 昭和新生山 50 周年記念事業実行委員会(Executive Committee of the 50th Anniversary of Mt. Showa-Shinzan). 179p.
- Minami, Y., Imura, T., Hayashi, S. and Ohba, T., 2016, Mineralogical study on volcanic ash of the eruption on September 27, 2014 at Ontake volcano, central Japan: correlation with porphyry copper systems. *Earth Planets Space*, **68**, doi: 10.1186/s40623-016-0440-2
- Miura, K., Ban, M., Ohba, T., Fujinawa, A., 2012, Sequence of the 1895 eruption of the Zao volcano, Tohoku Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **247-248**, 139–157.
- 宮縁育夫・渡辺一徳(Miyabuchi, Y. and Watanabe, K.), 1997, 埋没黒ボク土層の ^{14}C 年代からみた完新世阿蘇火山(Eruption ages of Holocene tephra from Aso Volcano, Southwestern Japan, inferred from ^{14}C ages of buried andisols). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **42**, 403–408
- 宮縁育夫・渡辺一徳(Miyabuchi, Y. and Watanabe, K.), 2000, 阿蘇火山地獄温泉付近における水蒸気爆発とその堆積物(Phreatic explosions and ejecta around Jigoku Spa, Southwestern part of the central cones of Aso Volcano, Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **45**, 25–32.
- 宮城磯治・伊藤順一・篠原宏志・鹿児島地方気象台(Miyagi, I., Itoh, J., Shinohara, H. and Kagoshima Meteorol. Office), 2010, 火山灰から見た 2008 年の桜島昭和火口の再活動過程(Re-activation process of Showa volcanic vent at Sakura jima Volcano in 2008: Evidence from volcanic ash). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **55**, 21–39.
- 三宅康幸・小坂丈予(Miyake, Y. and Osaka, J.), 1998, 長野県安曇村中ノ湯における 1995 年 2 月 11 日の水蒸気爆発(Steam Explosion of February 11th, 1995 at Nakanoyu Hot Spring, Nagano Prefecture, Central Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **43**, 113–121.
- 三宅康幸・齋藤美由紀・竹下欣宏・及川輝樹・齋藤武士(Miyake, Y., Saito, M., Takeshita, Y., Oikawa, T. and Saito, T.), 2009, 日光男体火山における約 1 万年前の火砕流堆積物の発見(A newly found pyroclastic flow deposit around 10 ka at Nikko Nantai Volcano, Northeast Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **54**, 163–173.
- 水垣 滋・三島啓雄・菊池俊一・新谷 融(Mizugaki, S., Mishima Y., Kikuchi, S. and Araya, T.), 2001, 有珠山 2000 年噴火による流域荒廃と泥流(The sediment disasters and mudflows by the 2000 Eruption of Usu Volcano). 砂防学会誌(*Jour. Japan Soc. Erosion Control Engin.*), **54**, 47–53.
- 守屋以智雄(Moriya, I.), 1994, 火山層序学的調査に基づく噴火の長期予測(Long-Term Prediction of Volcanic Eruptions Based on the Data from Records and Volcani-stratigraphical Investigations). 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(*Summaries of Researches Using AMS Nagoya Univ.*), **5**, 121–133.
- Muffler, L. J. P., White, D. E. and Truesdell, A. H., 1971, Hydrothermal explosion craters in Yellowstone National Park. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **82**, 723–740.
- Murai, I., 1962, A Brief Note on the Eruption of the Yake-dake Volcano of June 17, 1962. (*Bull. Earthq. Res. Inst.*), **40**, 805–814.
- 中村俊夫(Nakamura, T.), 2003, 加速器質量分析(AMS)による環境中およびトレーサ放射性同位体の高感度測定(High Sensitivity Measurements of Environmental and Tracer Radioisotopes with Accelerator Mass Spectrometry). *RADIOISOTOPES*, **52**, 145–171.
- 中村洋一・ハリー グリッケン(Nakamura, Y. and Glicken, H.), 1988, 磐梯火山 1888 年噴火のプラストとデブリ・アバラシ堆積物(Blast and debris-avalanche deposits of the 1888 Eruption, Bandai Volcano). 地学雑誌(*Jour. Tokyo Geogr. Soc. Japan*), **97**, 309–316.
- 小木曾千秋・上原陽一(Ogiso, C. and Uehara, Y.), 1985, 相平衡破壊型蒸気爆発の実験的研究(Experimental study of the steam explosion of the destruction of phase-equilibrium type)*. 安全性工学(*Jour. Japan Soc. Safe. Engin.*), **24**, 192–198.
- 大場 司(Ohba, T.), 2011, 熱水変質鉱物に富む火山噴出物—火山直下熱水系との関係, 噴火機構, 繰り返し様式(Hydrothermal mineral-bearing volcanic products: Relationships with sub-volcanic hydrothermal systems, and styles and patterns of their formation). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **117**, 344–356.
- 大場 司・林 信太郎・伴 雅雄・近藤 梓・葛巻貴大・鈴木真悟・古木久美子(Ohba, T., Hayashi, S., Ban, M., Kondo, A., Kuzumaki, T., Suzuki, S. and Furuki, K.), 2012, 最近 4500 年間の鳥海火山の噴火活動: 湿原堆積物に保存された火山灰層の解析(Eruptive history at Chokai Volcano during the last 4000 years: Implication from ash layers preserved in peat soil). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **57**, 65–76.
- Ohba, T. and Kitade, Y., 2005, Subvolcanic hydrothermal systems: implications from hydrothermal minerals in hydro-volcanic ash. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **145**, 249–262.
- Ohba T., Taniguchi H., Miyamoto T., Hayashi S. and Hasenaka T., 2007, Mud plumbing system of an isolated phreatic eruption at Akita Yakeyama volcano, northern Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **161**, 35–46.
- 大沢信二・大上和敏・由佐悠紀(Ohsawa, S., Oue, K. and Yusa, Y.), 1996, 1995 年伽藍岳塚原鉱山跡に出現した泥火山(A mud volcano formed on the site of Tsukahara Mine at the western flank of Garandake Volcano in 1995). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **41**, 103–106.
- 及川輝樹(Oikawa, T.), 2002, 焼岳火山群の地質: 火山発達史と噴火様式の特徴(Geology, volcanic history and eruptive style of the Yakedake Volcano Group, Central Japan). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **108**, 615–632.
- 及川輝樹(Oikawa, T.), 2011, 中小規模テフラも対象とした高時間分解能火山層序学(入門) (Introduction of high temporal resolution volcanic stratigraphy). 月刊地球(*Chikyu Monthly*), **33**, 719–725.
- 及川輝樹(Oikawa, T.), 2012, 赤城山と栗駒山の歴史時代の噴火記録(Historical eruption records of Akagi Volcano, central Japan and Kurikoma Volcano, northeast Japan). 日本火山学会講演予稿集 2012(2012 Fall Meet. Volcanol. Soc. Japan, Abstr.), 14–14
- 及川輝樹(Oikawa, T.), 2015, 水蒸気噴火で発生する低温火砕流—焼岳大正池噴火(1915)とその類例—(Low temperature pyroclastic flow (pyroclastic density current) from phreatic eruption). 地球惑星連合大会 2015 年講演要旨(JPGU Meet. 2015, Abstr.), SVC47–09.

- 及川輝樹(Oikawa, T.), 2016a, 2014年御嶽山噴火(Ontake 2014 eruption)*. 地質と調査(*Chisitsu to Chousa*), **1**, 12–17.
- 及川輝樹(Oikawa, T.), 2016b, 日光白根火山の歴史時代の噴火(Historical eruption of Nikko Shirane Volcano). 地球惑星連合大会 2016年講演要旨(*JPGU Meet. 2016, Abstr.*), SVC48–09
- 及川輝樹・奥野 充・中村俊夫(Oikawa, T., Okuno, M. and Nakamura, T.), 2002, 北アルプス南部, 焼岳火山の最近約3000年間の噴火史(A review on phreatic eruptions and their precursors). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **108**, 88–102.
- 及川輝樹・筒井正明・大塚康宏・伊藤順一(Oikawa, T., Tsutsui, M., Daigaku, Y. and Itoh, J.), 2012, 文献史料に基づく江戸期における霧島火山新燃岳の噴火活動(Eruption history of Shinmoedake of Kirishima Volcanoes in Edo Period, based on the historical documents). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **57**, 199–218.
- 及川輝樹・山岡耕春・吉本充宏・中田節也・竹下欣宏・前野 深……中野 俊(Oikawa, T., Yamaoka, K., Yoshimoto, M., Nakada, S., Takeshita, Y., Maeno, F., Nakano, S.), 2015, 御嶽山2014年噴火(The 2014 Eruption of Ontake Volcano, Central Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **60**, 411–415.
- Oikawa, T., Yoshimoto, M., Nakada, S., Maeno, F., Komori, J., Shimano, T., Ishimine, Y., 2016, Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews. *Earth Planets Space*, **68**, doi: 10.1186/s40623-016-0458-5
- 及川輝樹・吉本充宏・小森次郎・前野 深・中田節也・竹下欣宏・嶋野 岳人・石塚 吉浩(Oikawa, T., Mitsuhiro Yoshimoto, M., Komori, J., Maeno, F., Nakada, S., Yoshihiro Takeshita, Y., Shimano, T. and Ishizuka, Y.), 2017, 御嶽山2014年水蒸気噴火とその後の侵食(The 2014 phreatic eruption of Ontake Volcano and the subsequent erosion). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **123**, I–II.
- 大井上義近(Oinoue, Y.), 1913, 有珠火山泥流上の瀛丘(Numerous cones on the mud flow of the Usu Volcano). 札幌博物学会会報(*Trans. Sapporo Natl. Hist. Soc.*), **4**, 204–206.
- 奥野 充(Okuno, M.), 1995, 降下テフラからみた水蒸気噴火の規模・頻度(Magnitude and frequency of phreatic eruptions, inferred from tephra-stratigraphy). 金沢大学文学部地理学報告(*Geogr. Rep. Kanazawa Univ.*), **7**, 1–23.
- 奥野 充(Okuno, M.), 2002, 水蒸気噴火の噴火史研究(Reconstruction of eruptive history of phreatic eruptions). 金沢大学文学部地理学報告(*Geogr. Rep. Kanazawa Univ.*), **10**, 29–36.
- 奥野 充(Okuno, M.), 2011, 地質調査による高分解能なテフラ層序学・年代学の構築(Establishment of a high-resolution tephrostratigraphy and chronology based on geological survey). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **117**, 654–662.
- 奥野 充・中原宏輔・竹原 聖・片平 要・鮎沢 潤・小林哲夫(Okuno, M., Nakahara, K., Takehara, S., Katahira, K., Aizawa, J. and Kobayashi T.), 2010, 霧島火山群, 新燃岳・昭和火山灰の50年間の体積変化(Volume changes for the past 50 years of the Shinmoedake-Showa Ash from Kirishima Volcano, SW Japan). 福岡大学研究部論集 C 理工学編(*Bull. Central Res. Inst., Fukuoka Univ. Ser. C, Sci. Tech.*), **2**, 43–47.
- Okuno, M., Nakamura, T., Moriwaki, H. and Kobayashi, T., 1997, AMS radiocarbon dating of the Sakurajima tephra group, southern Kyushu, Japan. *Nucl. Instru. Methods Phys. Res.*, **123**, 470–474.
- 小坂丈予(Ossaka, J.), 2003, 日本各地の火山噴出物に含有される粘土鉱物と噴火活動様式の考究(Clay minerals contained in volcanic ejecta and their correlation with volcanic activities in Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **48**, 43–61.
- 小坂丈予・平林順一(Ossaka, J. and Hirabayashi, J.), 1981, 火山活動に伴う粘土鉱物(Clay minerals in volcanic ejecta). 鉱物学雑誌(*Jour. Mineral. Soc. Japan*), **15**, 223–238.
- 小坂丈予・小沢竹二郎(Ossaka, J. and Ozawa T.), 1966, 1962年焼岳活動の噴出物とその噴火様式について(The 1962-ejecta from Mt. Yake, Nagano-Gifu Prefectures, and its mechanism of eruption). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **11**, 17–29.
- Procter, J. N., Cronin, S. J., Zernack, A. V., Lube, G., Stewart, R. B., Nemeth, K. and Keys, H., 2014, Debris flow evolution and the activation of an explosive hydrothermal system; Te Maari, Tongariro, New Zealand. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **320**, 128–143.
- Pyle, D. M., 2000, Sizes of volcanic eruptions. In Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H., Stix, J., eds., *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, London, 263–269.
- Sasaki, H., Chiba, T., Kishimoto, H. and Naruke, S., 2016, Characteristics of the syneruptive-spouted type lahar generated by the September 2014 eruption of Mount Ontake, Japan. *Earth Planets Space*, **68**: 141. doi: 10.1186/s40623-016-0516-z.
- 佐々木 寿・稲葉千秋・向山 栄(Sasaki, H., Inaba, C. and Mukoyama, S.), 2006, 雌阿寒岳 2006年3月21日噴火(口絵写真解説)(The eruption of Meakandake Volcano on March 21, 2006, Hokkaido, Japan (Photogravure)). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 347–350.
- 佐藤伝蔵(Sato, D.), 1910, 有珠嶽火山破裂調査概報(*Summary Report of the Eruption of Usu Volcano*)*. 地質調査所報告(*Rep. Geol. Surv. Japan*), **22**, 1–46.
- Sato, H. and Taniguchi, H., 1997, Relationship between crater size and ejecta volume of recent magmatic and phreatomagmatic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 205–208.
- Scott, K. M., Vallance, J. W. and Pringle, P. T., 1995, Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.* **1547**, 56p.
- Sheridan, M. F., 1980, Pyroclastic block flow from the September, 1976, eruption of La Soufriere volcano, Guadeloupe. *Bull. Volcanol.* **43**, 397–402.
- Smith, G. A., 1986, Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **97**, 1–10.
- 田口幸洋・糸井龍一・甲斐辰次・渡部公一郎・江原幸雄・筒井智樹(Taguchi, S., Itoi, R., Kai, S., Watanabe, K., Ehara, Y. and Tsutsui, T.), 1996, 噴出物からみた1995年九重硫黄山の噴火過程(Volcanic process of the 1995 Kuju Iwoyama eruption, based on ejected materials)*. 文部省科研究費突発災害調査研究成果報告書. 1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究(*Reports on Mechanism of Yhreatic Yruption and Yrocess of Yolcanic Yctivity in October, 1995 at Kuju volcano*), 75–82.
- 田島靖久・林信太郎・安田 敦・伊藤英之(Tajima, Y., Hayashi, S., Yasuda, A. and Itoh, H.), 2013, テフラ層序による霧島火山, 新燃岳の噴火活動史(Tephrostratigraphy and eruptive history of Shinmoedake volcano of the Kirishima volcanoes, Kyushu, Japan). 第四紀研究(*Quatern. Res.*), **52**, 151–171.
- 田島靖久・松尾雄一・庄司達弥・小林哲夫(Tajima, Y., Matsuo, Y., Shoji, T. and Kobayashi, T.), 2014, 霧島火山, えびの高原周辺における最近15,000年間の活動史(Eruptive history of Ebinoogen Volcanic area of Kirishima Volcanoes for the past 15,000 years in Kyushu, Japan). 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **59**, 55–75.
- 宝田晋治・吉本充宏・北川淳一・平賀正人・山元孝広・川辺禎久……高橋 良(Takarada, S., Yoshimoto, M., Kitagawa, J., Hiraga, N., Yamamoto, T., Kawanabe, Y., Takahashi, R.), 2001, 有珠火山2000年噴火の降灰と火口近傍の状況(Volcanic ash falls from the Usu 2000 eruption and situation at the source area). 地質調査研報(*Bull. Geol. Surv. Japan.*), **52**, 167–179.
- Takarada, A., Oikawa, T., Furukawa, R., Hoshizumi, H., Itoh, J., Geshi, N. and Miyagi, I., 2016, Estimation of total discharged mass from the phreatic eruption of Ontake Volcano, central Japan, on September 27, 2014. *Earth Planets Space*, **68**, doi: 10.1186/s40623-016-0511-4

- 田中館秀三・三松正夫・今村明恒(Tanakadate, H., Mimatsu, M. and Imamura, A.), 1944, 有珠山の噴火状況(1944 eruption of Usu Volcano)*. 地震 第1輯(Zisin(Jour. Seismol. Soci. Japan)), 16, 280–287.
- Tsunematsu, K., Ishimine, Y., Kaneko, T., Yoshimoto, M., Fujii, T. and Yamaoka, K., 2016, Estimation of ballistic block landing energy during 2014 Mount Ontake eruption. *Earth Planets Space*, 68, doi: 10.1186/s40623-016-0463-8
- 筒井正明・奥野 充・小林哲夫(Tsutsui, M., Okuno, M. and Kobayashi, T.), 2007, 霧島・御鉢火山の噴火史(Eruptive history of Ohachi Volcano, Kirishima Volcano Group, Southern Kyushu, Japan). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 45, 75–85.
- 筒井正明・富田克利・小林哲夫(Tsutsui, M., Tomita, K. and Kobayashi, T.), 2005, 霧島・御鉢火山における2003年12月以降の噴気活動と明治～大正時代の火山活動(Fumarolic activity since December 2003 and volcanic activity during the Meiji and Taisho Eras(1880–1923) of Ohachi Volcano, Kirishima Volcano Group, Southern Kyushu, Japan). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 50, 475–489.
- 上澤真平(Uesawa, S.), 2008, 北海道十勝岳火山1926年噴火大正泥流堆積物層序の再検討と古地磁気特性(Restudy of stratigraphy and paleomagnetic characteristics of Taisho Lahar Deposit associated with the 1926 Eruption on Tokachidake Volcano, Central Hokkaido, Japan). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 53, 171–191.
- 宇井忠英・柴橋敬一(Ui, T. and Shibahashi, K.), 1975, 鳥海山1974年の火山活動(Activity of Chokai Volcano, Northeastern Japan). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 20, 51–64.
- 宇井忠英・吉本充宏・古川竜太・石塚吉浩・吉田真理夫・宮地直道……野上健治(Ui, T., Yoshimoto, M., Furukawa, R., Ishizuka, Y., Yoshida, M., Miyaji, N., ...Nogami, K.), 1997a, 北海道駒ヶ岳1996年3月の噴火(March 1996 Eruption of Hokkaido-Komagatake, Northern Japan). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 42, 141–151.
- 宇井忠英・吉本充宏・佐藤十一・橋本 勲・宮村淳一(Ui, T., Yoshimoto, M., Sato, J., Hashimoto, I., Miyamura, J.), 1997b, 北海道駒ヶ岳1996年3月噴火の噴出量の再検討(March 1996 eruption of Hokkaido Komagatake: Reappraisal on eruption volume). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 42, 429–431.
- 梅屋 薫・磯田武信・小泉源三・加藤和男(Umeya, K., Isoda, T., Koizumi, G. and Kato, K.), 1972, 粘土-水懸濁液の流動挙動(Some Observations on the Flow Behavior of Clay-Water Suspensions). 材料(Jour. Soc. Mater. Sci. Japan), 21, 469–475.
- Vallance, J. W. and Scott, K. M., 1997, The Osceola mudflow from Mount Rainier: Sedimentology and hazard implication of a huge clay-rich debris flow. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 109, 143–163.
- Vallance, J. W. and Iverson, R. M., 2015, Lahars and Their Deposits. In Sigurdsson H. (Editor-in-Chief), Houghton B., McNutt, S. R., Rymer H. and Stix, J., eds., *The Encyclopedia of Volcanoes, 2nd Ed.*, 649–664.
- 和知 剛・土井宣夫・越谷 信(Wachi, T., Doi, N. and Koshiya, S.), 1997, 秋田駒ヶ岳のテフラ層序と噴火活動(Tephra stratigraphy and eruptive activities of the Akita-Komagatake Volcano). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 42, 17–34.
- Walker, G. P. L., 1971, Grain-size characteristics of pyroclastic deposit. *Jour. Geol.*, 79, 696–714.
- 渡辺武男・下斗米俊夫(Watanabe, T. and Shimotomai, T.), 1937, 北見国知床硫黄山, 特に昭和11年の活動に就いて(Showa 11 (1937) activity of Iwo Yama, Hokkaido, Japan)*. 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 3, 213–262.
- 八幡正弘(Yahata, M.), 2002, 有珠火山2000年噴火におけるマグマ水蒸気: 水蒸気爆発による破砕深度とその時間的変化(Fragmentation depths and its temporal variation during Usu 2000 phreatomagmatic-and phreatic eruptions). 火山(Bull. Volcanol. Soc. Japan), 47, 263–278.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 1997, テフラ層序からみた那須茶臼岳火山の噴火(Eruptive history of Nasu-Chausudake volcano, NE Japan, based on tephrostratigraphy). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), 103, 676–691.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 2001, 有珠火山2000年噴火でのマグマ水蒸気爆発と火砕流到達域予測(The 2000 eruption of Usu Volcano, Japan: characteristics of phreatomagmatic explosions and hazard evaluation for pyroclastic density currents). 地質調査研報(Bull. Geol. Surv. Japan), 52, 231–239.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 2005, 福島県, 吾妻火山の最近7千年間の噴火史: 吾妻-浄土平火山噴出物の層序とマグマ供給系(Eruptive history of Azuma volcano, NE Japan, during last 7,000 years: Stratigraphy and magmaplumbing system of the Azuma-Jododaira products). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), 111, 94–110.
- 山元孝広(Yamamoto, T.), 2014, 御嶽火山2014年9月27日噴火で発生した火砕流(The pyroclastic density currents generated by the September 27, 2014 phreatic eruption of Ontake Volcano, Japan). 地質調査研報(Bull. Geol. Surv. Japan), 65, 117–127.
- Yamamoto, T., Nakamura, Y., Glicken, H., 1999, Pyroclastic density current from the 1888 phreatic eruption of Bandai volcano, NE Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 90, 191–207.
- 山元孝広・阪口圭一(Yamamoto, T. and Sakaguchi, K.), 2000, テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約25万年間の噴火活動(Eruptive history of Adatara volcano, NE Japan, during last 250,000 years based on tephrostratigraphy). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), 106, 865–882.
- 山元孝広・須藤 茂(Yamamoto, T. and Suto, S.), 1996, テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史(Eruptive history of Bandai volcano, NE Japan, based on tephrostratigraphy). 地調月報(Bull. Geol. Surv. Japan), 47, 335–359.
- Yamada, T., 1962, Report of the 1962 activity of Yakedake Volcano, central Japan. *Jour. Fac. Liberal Arts Sci., Shinshu Univ. Pt. 2 Natl. Sci.*, 12, 47–81.
- 山田洋右(Yamada, Y.), 1982, 粘土のチクソトロピーに関する研究(A Study on Thixotropy of Clays). 粘土科学(Jour. Clay Sci. Soc. Japan), 22, 68–74.
- [URL1] 産業技術総合研究所地質調査総合センター(GSJ/AIST), 1万年噴火イベントデータ集(ver. 2.3) (Catalog of eruptive events during the last 10,000 years in Japan, version 2.3). <https://gbank.gsj.jp/volcano/eruption/index.html>.
- [URL2] 気象庁(JMA), 全国の活火山の活動履歴等(Eruption and volcanic history of Japanese volcanoes)*. http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/vol_know.html#ireiki.

* English translation from the original written in Japanese

(執筆分担)

及川輝樹 各項目のレビュー, 全体の執筆・調整・編集を担当
大場 司 水蒸気噴火の定義と熱水変質鉱物のレビューを主に担当
藤縄明彦 火砕流のレビューを主に担当
佐々木 寿 火口噴出型ラハールのレビューを主に担当

(要 旨)

及川輝樹・大場 司・藤縄明彦・佐々木 寿, 2018, 水蒸気噴火の地質学的研究. 地質雑, **124**, 231–250. (Oikawa, T., Oba, T., Fujinawa, A. and Sasaki, H., 2018, Geological study of phreatic eruptions. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 231–250.)

噴出物中に本質物を含まない水蒸気噴火は、地球上でもっともありふれた噴火の一つである。我々は水蒸気噴火の各種特徴のレビューを行った。水蒸気噴火は、過熱水が急激に水蒸気に変化することで発生する噴火である。水蒸気噴火の噴出物は、粘土分に富んだ火山灰と変質ないし未変質の火山礫・火山岩塊で構成される。一回の水蒸気噴火は1時間から1日程度で終了することが多いが、同程度の規模の噴火を数年間にわたり繰り返すこともある。一回の水蒸気噴火における噴出量は 10^8 m^3 (見かけ体積) 以下である。水蒸気噴火で発生する現象は、降下テフラ、投出岩塊、比較的低温(概ね 100°C 程度)の火砕流、火口噴出型ラハールなどである。このうち低温の火砕流、火口噴出型ラハールの詳しい記載は少ない。層相からそれらの現象を判断し復元できるようにすることは今後の課題である。

科学論文では、学説の検証可能性を保証することが重要です。そのため、地質学雑誌掲載論文には、重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります。言うまでもないことですが、見学や採取を行う場合、各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい。詳しくは、以下のサイトをご覧ください。

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会