

土木インフラ維持のための降下火山灰による 災害の予測と対策の検討

早稲田大学理工学術院 教授 柴山知也

概要：

本研究では、火山の噴火直後に降下火山灰による土木インフラへの被害予測と対策立案ができる実用的な手法の確立を目的に、降下火山灰の分布予測手法の開発と災害事例の分析に取り組んだ。本研究で提案した手法は、メソスケール気象予測モデル WRF 及びメソスケール化学輸送モデル WRF-Chem を用いて火山の噴火後迅速に降灰範囲を予測する速報型の予測手法である。同手法を 2014 年御岳山噴火の再現計算に適用したところ、噴火継続時間や火山灰の粒径分布の正確な入力計算精度に重要であることがわかった。また、様々な気象条件下に適用できるよう数値モデルを改良し、1707 年宝永富士山噴火を対象として、異なる季節に噴火が発生した場合の降灰範囲の違いを分析した。さらに、2017 年 10 月に噴火した新燃岳を対象として噴火 2 日後に現地調査を行った。現地調査で得られた粒径分布を数値解析の入力条件に用いれば、数値モデルにより降灰範囲を概ね評価できることを示した。

キーワード: 火山, 火山灰, WRF, WRF-Chem, 降下火山灰分布予測

1. 研究の目的

日本は世界有数の火山国である。気象庁によれば、桜島など頻繁に噴火を繰り返している火山をはじめとして、日本全国に 110 の活火山がある。わが国を代表する富士山も活火山の一つとして数えられる。1707 年の宝永噴火の際には南関東の広範囲な地域で火山灰が堆積したことが知られている。将来、このような大規模噴火が発生すれば、降下した火山灰により道路や鉄道、河道など土木インフラに大きな影響を及ぼすことが懸念される。

本研究では、火山噴火に伴う降下火山灰による災害を対象に、降下火山灰の分布予測数値モデルを開発し、降下火山灰による災害シナリオの提示と対策の立案を行う。困難であるとされる噴火の予知にもとづくのではなく、噴火直後に得られる状況をもとに火山灰の降灰範囲を予測し、土木インフラの維持にあたる技術者がいち早く必要な対応を始められるようになることを目指す。

2. 研究方法

降下火山灰による災害、特に首都圏での道路や河道を中心とする土木インフラへの影響について着目し、噴火直後に被害予測と対策立案ができる実用的な手法の確立

を目指す。具体的には、①気象モデルと火山灰移流・拡散モデルを用いた降下火山灰の分布予測数値モデルの開発とその首都圏への適用、②1707 年宝永富士山噴火などの歴史災害の分析に依拠した降下火山灰に起因する災害像の整理、③首都圏での降下火山灰による災害シナリオの提示と土木工学における既往の知見を活用した対策の立案を行う。なお、平成 29 年度はこれらの内、①と②について主に実施した。また、①で開発した数値モデルの高性能化と新燃岳周辺の火山灰の降下状況を解明するため、2017 年 10 月 13 日に新燃岳東側に位置する宮崎県西諸県郡高原町において現地調査を実施した。

3. 研究結果

(1) 降下火山灰の分布予測数値モデルの開発

メソスケール気象予測モデル WRF¹⁾及びメソスケール化学輸送モデル WRF-Chem²⁾を用いて、火山の噴火後迅速に火山灰の降灰範囲を予測する速報型の予測手法を提案した。図-1 に本手法の概要図を示す。本手法では、噴火直後に噴煙高さなどの数値予測を行うために必要な情報を即座に収集し、その情報を数値モデルに入力することで降灰範囲を予測する。噴火範囲を予め予測するのではなく、噴火直後に得られる実際の情報を用いることで

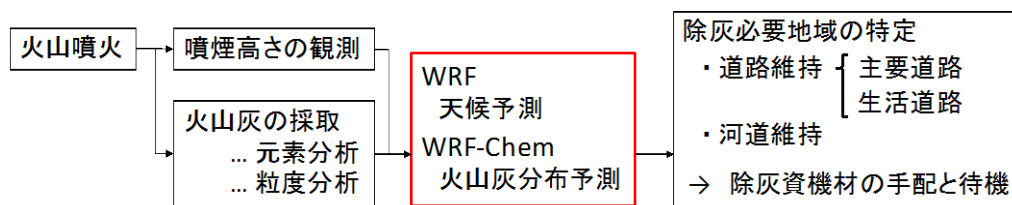


図-1 WRF-Chemを用いた火山灰分布の予測手法

数日先までの降灰範囲を精度よく予測しようとしている点に特徴がある。この手法を用いて噴火後の降灰範囲を予測することで、土木技術者が迅速に降灰への対策を講じることが可能となる。

数値モデルに入力が必要なデータは、主に気象データ、噴煙高度、噴火継続時間である。気象データは、アメリカ海洋大気庁 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)より提供されている気象予報データ GFS(Global Forecast System)を使用する。起点となる日時から16日先までの気象予報データを利用可能であり、これを用いることで、噴火から最大16日先までの気象状況を予測することが可能となる。噴煙高度には、気象庁及び東京航空路火山灰情報センター(東京VAAC)によって噴火直後に配信される最新の情報を使用し、噴火の継続時間は、原則として火山爆發指数(VEI)によって推定される値を使用する。

(2) 2014年御嶽山噴火を対象としたケーススタディ

2014年9月27日に発生した御嶽山噴火を対象として、災害事例の分析と開発した予測モデルの適用を行った。

a) 御嶽山噴火の概要

御嶽山は長野県と岐阜県の県境に位置する標高3,067mの火山である。有史以降の噴火活動では、2007年の小規模噴火を最後に目立った活動はなかったが、2014年9月27日11時52分頃、剣ヶ峰の南西側の火口において噴火が発生し、多数の死傷者を出す大災害となった。噴火によって降下した火山灰は大部分が変質岩片で構成されており、マグマ由来の成分が検出されなかったことから噴火様式は水蒸気爆發に分類された。日本国内において噴火災害で死者が出たのは1991年6月3日の雲仙・普賢岳の大火砕流以来であり、死者数も1991年の43名を上回る戦後最悪の58名となった。

一般的に、今回のようなマグマ活動を伴わない水蒸気爆發の場合は予知が難しいとされている。気象庁の発表によると、噴火のおよそ2週間前である9月10日から山頂付近での火山性地震が増加しており、マグマ活動との関連が指摘される火山性微動も噴火の約10分前に観測されるなど、いくつかの前兆が観測されていた。しかし、衛星利用測位システム(GPS)や傾斜計のデータに異常はなく、マグマ上昇を示す山体膨張も観測されなかった。

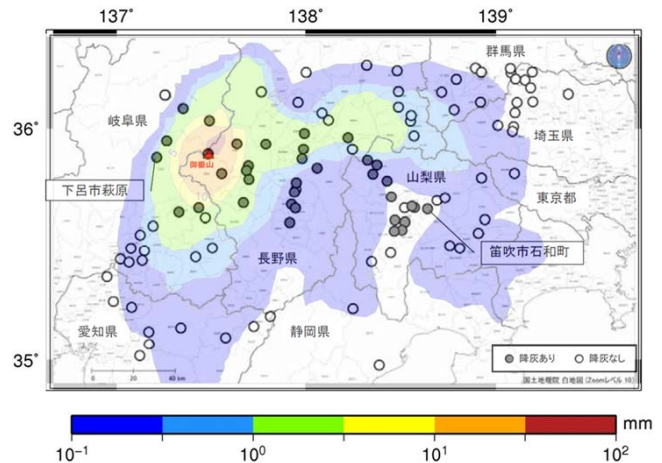


図-2 同一時刻における現地調査結果と計算結果の比較

め噴火前に警報が発令されることはなかった。

b) 計算条件(御嶽山噴火)

噴火直後に得られた初期条件を基に計算を行なった。気象データは前述したGFSを参照し、2014年9月27日0時時点に配信された最新の気象予報データを使用した。今回のケースでは噴火の4分後である11時56分に気象庁東京航空路火山灰情報センター(東京VAAC)により噴煙高度FL370(約11,270m)との情報が発信されたが、その後12時2分に同じく東京VAACにより噴煙高度が5,480mに修正されたことから、計算ではその中間値にあたる8,500mの噴煙高度で、およそ3時間噴火が継続した場合を仮定した。

c) 計算結果(御嶽山噴火)

図-2に、予測計算の結果を実際に降灰が確認された地域に重ねて示す。なお、計算にかかる所要時間は、気象データの入手からWRF-Chemの計算、結果の図示までで最短2時間程度であった。したがって、噴火の発生した11時52分の2時間後である14時頃にはこうした計算結果を得ることが可能である。

実際に降灰が確認された地域と数値予測の結果を比較すると、計算では火山灰がより広範囲に分布していることがわかる。このように違いが生じた原因として、数値計算で仮定した噴火の継続時間を過大評価していたことが考えられる。噴火継続時間を過大評価したことで火山灰が長時間上空に浮遊し、絶えず変化する風向きに影響を受け広範囲に拡散した可能性がある。また、御嶽山の周りには標高の高い山々が連なることも数値計算結果に

影響を与えた可能性がある。WRF-Chemを用いた計算では高標高部ほど降灰量を過大に評価する傾向があることがこれまでの研究代表者らの研究でわかっており、今回のケースにおいても、比較的標高が高い地域に降灰が集中していることが確認できる。一方で、今回の御嶽山の噴火では山頂（剣ヶ峰）で最大 35 cm、剣ヶ峰西側の一ノ池南縁の鞍部で約 70 cm の降灰が報告されているのに対し、本計算では山頂付近で最大 10 cm 程度の降灰量に留まっている。このことは、本計算では実際の火山灰よりも細かい粒径分布を想定していたことを示唆している。WRF-Chem ではオプション機能として噴出する火山灰の粒径分布を設定することができるが、噴火時には詳細な割合が分からないため、本計算では火山ごとに予め設定されている粒径分布を用いている。つまり、計算では極粗粒砂(1~2 mm)と極細粒砂(0.0625~0.125 mm)の割合が多く設定されている。しかし、産業技術総合研究所³⁾によると、御嶽火山東山麓の開田高原で採取した火山灰の代表粒径は中粒砂(0.25~0.5 mm)および細粒砂(0.125~0.25 mm)であったとの報告がある。このことから、数値計算で設定した粒径分布が実際のものと比較して細かく、実際の噴火では火口付近に集中して降り積もった火山灰が本計算では薄く広く移流拡散した可能性が考えられる。

(3) 富士山噴火を対象としたケーススタディ

富士山は活火山の一つであり、噴火が懸念されている。富士山周辺は東名高速道路、東海道新幹線など、交通幹線ネットワークが通過しており、首都圏や中京圏をはじめとする広範囲の地域が交通に大きな影響を受ける可能性がある。本研究では、様々な気象条件下に数値予測モデルを適用できるように改良し、その適用性について検討した。具体的には、1707年の宝永富士山噴火と同規模の噴火が気象条件の異なる夏と冬に起きた状況を想定し、それぞれについて降灰範囲の予測を実施した。

夏と冬それぞれのモデルによる計算結果を図-3に示す。夏と冬のシミュレーション結果を比較すると、夏の方が降灰量が全体的に多い結果となった。これは、冬は日本上空で偏西風が強くなり、偏西風に載せられた火山灰が遠方に移流・拡散するためシミュレーション範囲内の火山灰量が少なくなったためと考えられる。

(4) 新燃岳の噴火調査と数値予測

2017年10月11日午前5時34分頃、宮崎県と鹿児島県の県境に位置する標高1421mの霧島山新燃岳が2011年以来6年ぶりに噴火した。気象庁発表資料によると、9月23日頃頃から火山性地震が増加し、10月5日には小規模な噴火の恐れがあるとして噴火警戒レベルが1(活火山であることに留意)から2(火口周辺規制)へ引き上

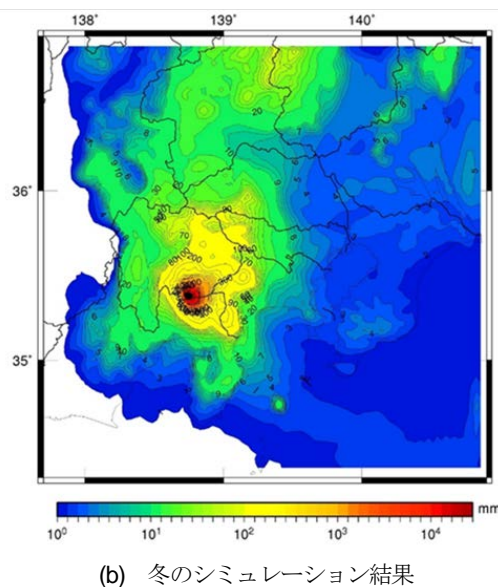
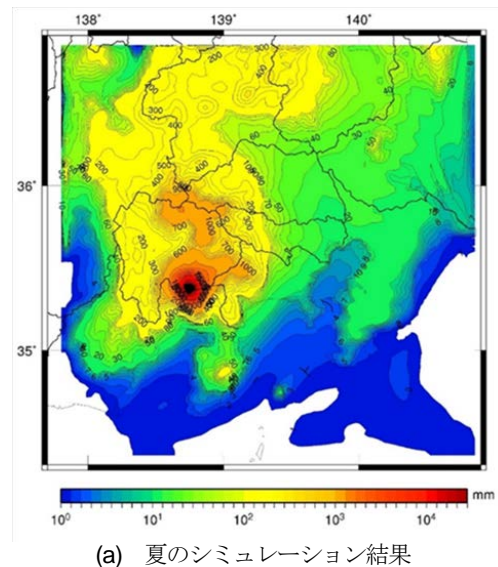


図-3 富士山噴火を対象とした数値計算結果

げられた。10月6日からは火山性微動が発生し、10月11日午前5時34分に噴火が発生すると噴火警戒レベルが3(入山規制)に引き上げられた。噴火は一旦収まったかのようにみられたが、14日に再開し、噴煙高度は火口縁上最大2,300mまで達した後、17日未明には停止したとみられている⁴⁾。噴火の様子はメディアを通じて報道され、新燃岳周辺で降灰が確認されていることがわかった。これを受けて、数値モデルの高性能化と新燃岳周辺の火山灰の降下状況を解明するため、2017年10月13日に新燃岳東側に位置する宮崎県西諸県郡高原町において現地調査を実施した。現地調査では、高原町において降灰があったことを確認し、調査地点における降灰量の計測及び元素分析等を行う為に火山灰試料の採取を行った。また今回の噴火に対して数値予測モデルを適用し、計算結果と現地調査結果との比較を行った。

a) 現地調査の概要

2017年10月13日、降灰量が多いことが予想される霧

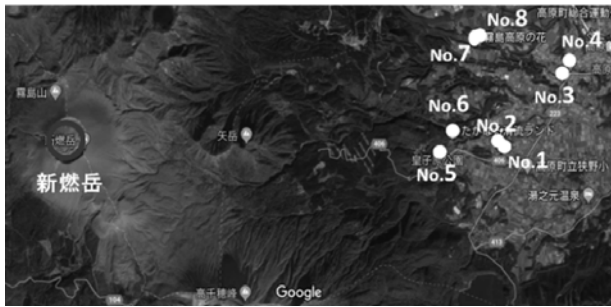


図-4 新燃岳と現地調査地点 (Google Maps に加筆)

表-1 降灰量測定結果

採取地点番号	採取範囲の面積(m ²)	乾燥質量(g)	降灰量(g/m ²)
No.2	0.0085	0.474	55.8
No.3	0.2500	41.204	165
No.4	0.2500	35.127	141
No.5	0.2654	15.122	57.0
No.7	0.2640	33.332	126
No.8	0.3480	36.249	104

島山新燃岳東側に位置する宮崎県西諸県郡高原町付近の複数の地点において現地調査を行った。各調査地点における降灰量の測定の他に1地点で粒径分析、元素分析に用いる試料の採取を行った。現地調査は図-4に示す8地点でそれぞれ行った。

今回の噴火の規模を把握するため、No.1及びNo.6を除く各調査地点において降灰量の測定を行った。現地調査当日に、各調査地点にて火山灰を採取する範囲をそれぞれ設定し、その範囲の中の火山灰を採取した。火山灰の採取は刷毛と塵取りにより行い、火山灰の取り残しが無いよう注意深く行った。各地点における火山灰の採取は、No.2では8.5 cm×10.5 cmの枠内、スペースの広がったNo.3, No.4では50cm四方の正方形枠の枠内、No.5では20.8 cm×127.6 cmの枠内、No.7では側溝の蓋1枚分(長方形ではない、0.2640 m²)、No.8では58 cm×60 cm枠内で行った。

採取した火山灰を持ち帰り、早稲田大学土質実験室でまず試料の異物を取り除くため、火山灰の定義に従い2 mmのふるいを使用してふるい分けを行い、粒径が2mm以上の粒子を異物として取り除いた。その後、乾燥炉を使用し各試料を設定温度110℃でおよそ24時間乾燥させ、乾燥質量を測定した。測定された乾燥質量と採取範囲の面積から1 m²あたりの質量を算出し、この値を降灰量として扱うこととした。降灰量測定結果を表-1に示す。また、降灰量測定のほか、粒度分析、元素分析を実施した。この測定結果を用いて数値計算結果との比較を行った。

b) 計算条件(新燃岳噴火)

開発した降下火山灰の分布予測数値モデルを用いて、2017年10月11日午前5時34分より始まった新燃岳噴火に伴う火山灰移流・拡散の数値計算を行った。計算結

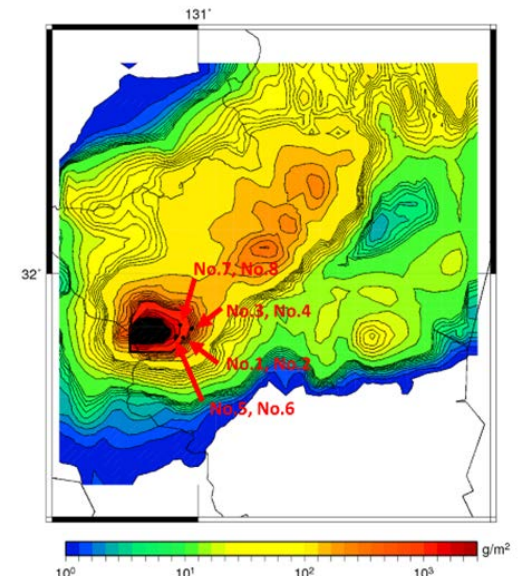


図-5 新燃岳噴火を対象とした数値解析結果

表-2 現地調査結果と計算結果の比較

採取地点番号	現地観測値(g/m ²)	計算値(g/m ²)	計算値/観測値
No.3	165	1050	6.37
No.4	141	1000	7.12
No.2	55.8	1400	25.1
No.5	57.0	2500	43.9
No.7	126	2200	17.4
No.8	104	2100	20.2

果と現地調査結果の比較を行うため、計算期間は噴火開始時刻から現地調査当日の朝9時までとした。

WRF-Chemモデルでは、火山を噴火のタイプごとに分類しており、分類されたそれぞれのタイプごとにあらかじめ平均的な粒径分布・噴煙高さ等が規定されている。しかし、ユーザーが独自にこれらの値を上書きすることも可能であり、現地観測が可能である場合、これらの観測値を反映させることでより正確な数値計算が可能となる。したがって今回の計算では、粒径分布は現地調査結果を使用し、噴煙高さは各機関から発表されている観測結果を使用することとした。なお、今回の計算では地上150m以下に存在する火山灰が全て地表に堆積したという仮定の下で火山灰堆積量を計算している。

c) 計算結果(新燃岳噴火)

噴火開始から36時間後(12日17時30分)の火山灰堆積量の計算結果を図-5に示す。計算による降灰範囲は全体的に東方向へ広がる結果となった。また、降灰範囲の時系列変化を見ると、12日になると降灰分布主軸は北東方向に移り、11日に比べ降灰範囲は広がった。このことは、東京大学地震研究所・防災科学技術研究所・熊本大学が合同で行った現地調査に基づいて作成された降灰分布図の傾向と概ね一致している⁹⁾。

現地調査によって得られた降灰量と計算結果を比較す

る(表-2)と、いずれの地点においても計算結果は現地調査結果を上回っているが、地点 No.3, No.4 では計算結果と現地調査結果の差が比較的小さいことがわかった。差の大きい4地点 (No.2, No.5, No.7, No.8) についてみると、No.2は樹木の生い茂る神社の敷地内の鳥居支柱一袖柱間の角材上、No.5はすぐ傍に木造屋根が取り付けられているデッキ上、No.7は民家塀下の道路側溝の蓋上、No.8は交通量の多い道路のすぐ傍の橋上のブロック上であった。地点 No.2, No.5, No.7は通常の降灰を妨げる障害物等が近辺に存在する地点であり、No.8は一度堆積した火山灰が通過する車両によって巻き起こる風で飛ばされてしまった可能性が高い地点であることがわかる。一方、比較的差の少なかった地点 No.3と No.4は、付近に障害物等がなく上空が開けており、一度堆積した火山灰の移流を再び発生させる要因も特に見当たらない地点であった。したがって、数値計算結果との比較においては近辺に通常の降灰を妨げる障害物等が存在せず、一度堆積した火山灰の移流を再び発生させる要因が少ない地点 No.3, No.4の現地調査結果が、より比較対象として適切であると考えられる。

以上を踏まえて計算結果を再び評価すると、比較対象として適切と思われる調査地点 No.3, No.4においては双方の差が1オーダー以内の過大評価にとどまっていることが確認できた。このことは、WRF, WRF-Chemモデルが一定の差の範囲内で火山灰の移流・拡散予測計算を行えることを示している。

4. まとめ

本研究では、火山の噴火直後に被害予測と対策立案ができる実用的な手法の確立を目的に、降下火山灰の分布予測数値モデルの開発と災害事例の分析に取り組んだ。

本研究で提案した手法は、メソスケール気象予測モデルWRF及びメソスケール化学輸送モデルWRF-Chemを用いて火山の噴火後迅速に火山灰の降灰範囲を予測する速報型の予測手法である。提案した手法を用いて、2014年9月27日に発生した御岳山噴火の再現計算を実施した。計算に要した所要時間は、気象データの入力から計算、結果の図示までに2時間程度であり、本手法を用いることで噴火後即座に災害情報を提供できることを確認した。予測結果の精度を観測結果との比較から検証したところ、噴煙高さや粒径分布を適切に設定することが降灰量や降灰範囲を計算する上で重要であることがわかった。また、数値モデルを様々な気象条件下で適用できるように改良した。1703年宝永富士山噴火を対象に、夏と冬の代表的な気象条件で計算を行った所、ふたつの計算結果には大きな違いがあることを確認した。

さらに、数値モデルの高性能化と降灰プロセスや降下火山灰による災害事例の解明を目的に、2017年10月11日に発生した霧島山新燃岳の噴火の現地調査を実施した。現地調査で得られた粒径分布を入力条件に数値モデルを新燃岳の火山噴火に適用した。その結果、計算結果の降灰範囲は主として火口から東方向に広がる傾向があり、他の調査機関が行った現地調査結果と概ね傾向が一致した。降灰量についての計算結果は、いずれの地点においても過大評価されたものの、計算結果との比較対象として適切と思われる地点における調査結果との差は1オーダー以内に収まった。ここから、実際の火山灰の粒径分布を数値モデルの入力に用いれば、本手法により一定の差の範囲内で火山灰の移流・拡散数値予測を行うことができることが示された。

今後の課題としては、提案した手法を首都圏を対象とした火山噴火の予測に適用し、災害シナリオの提示と有効な対策の立案を行う必要がある。

謝辞: 本研究を担当してきた早稲田大学・柴山研究室の歴代の学生である山口秀明、Non Okumura, 田野倉祐介、大島優、菅原奈津子、藤原恒太、脇田尚幸、富井遥亮の各氏と、三上貴仁博士(東京都市大学准教授)、高島知行博士(早稲田大学研究院講師)の研究への貢献に対して深く感謝する。新燃岳調査より持ち帰った火山灰の乾燥及び質量測定は早稲田大学土質実験室で行った。また、粒度分布試験は埼玉県産業技術総合センターに依頼した。元素分析試験は早大物性計測センターラボで行った。これらの方々には貴重な助言を頂き、深く感謝したい。

参考文献

- 1) National Center for Atmospheric Research: WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL WRF, <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>, 2017年12月7日参照。
- 2) National Center for Atmospheric Research: Modeling WRF-Chem, <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem>, 2017年12月7日参照。
- 3) 産業技術総合研究所: 御嶽火山2014年9月噴火(9月27-28日)で降下した火山灰解析, 火山噴火予知連絡会拡大幹事会, https://www.gsj.jp/hazards/volcano/kazan-bukai/yochiren/ontake_ash_140928.pdf, 2014, 2017年12月5日参照。
- 4) 中野俊, 及川輝樹, 石塚吉浩, 篠原宏志, 森田雅明: 霧島山新燃岳2017年10月の噴火, GSI地質ニュース, Vol.6, No.11, pp.351, 2017。
- 5) 東京大学地震研究所: 2017年10月11日霧島火山群新燃岳の噴火【最終更新10月20日】, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/2017/10/16/20171011shinmoedake/>, 2017, 2017年12月5日参照。