

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：57601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06664

研究課題名(和文) 建物の耐力と火山灰の堆積特性を考慮した効果的な除灰方法

研究課題名(英文) Effective Cleanup Method for Volcanic Ash on Roofs considering Building Strength and Property of Volcanic Ash Accumulation

研究代表者

山本 剛 (YAMAMOTO, TAKESHI)

都城工業高等専門学校・建築学科・准教授

研究者番号：20240103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：平成29年度は木造住宅の屋根模型に火山灰を降下させ、屋根に降下する火山灰重量に対する屋根に堆積する火山灰の割合を調べて乾燥火山灰の積灰荷重を評価した。平成30年度は屋根模型に堆積させた火山灰をショベルで除灰する作業をシミュレートし、除灰を行う際の運動強度を心拍数と主観的強度の測定により評価した。平成31年度は飽和火山灰を屋根に堆積させて湿潤火山灰の基本的な排水特性を明らかにした。また、木造住宅に積灰荷重が作用する際の構造安全性を許容応力度計算に基づいて評価した。さらに以上の結果を総合的に判断して除灰により木造住宅の構造安全性を確保するための除灰の開始が必要な地上堆積厚さと除灰の手順を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震や津波等の自然ハザードに比べ、発生頻度が極めて低い大規模噴火に伴う大量降灰による建築物の脆弱性ならびに積灰による屋根の損傷による人的被害の大きさと社会へのインパクト及びそれらの対策の重要性に着目し、独自に開発した実験装置および研究手法を用いて屋根への火山灰の降下実験、屋根に堆積した火山灰の排水実験、屋根に堆積した火山灰の除灰実験を実施し、それらの評価に基づいて建築物の構造安全性の確保のための除灰方法を展開していく点に独自性がある。また、屋根に降下する火山灰の堆積性状を実験的に解明しようとする研究は国内外ともにほとんど見当たらず、本研究は先駆的な研究である。

研究成果の概要(英文)：Volcanic ash falling test on pitched roofs were carried out to evaluate vertical load generated by ash fall on roofs. The ratio of the weight of volcanic ash on the ground to the weight of volcanic ash on the roof ranged from 30 to 80(%). To investigate exercise intensity during ash cleanup with shovel on roofs an experiment to reduce work burdens and improve workability in removing volcanic ash on roofs was carried out. The maximum heart rates of workers were 120 bpm to 130 bpm and the rating of RPE were 15 to 19. To discuss the vulnerability of timber buildings against ash load, I measured volume water content (VWC) of the volcanic ash deposited on the roofs covered with cement tiles and Galvalume steel plate for 14 days. VWC was from 8 to 23%. Building safety against the vertical load of volcanic ash deposited on the roofs of wooden houses was assessed. Purlin failure occurs with the loads of 3-5 kN/m².

研究分野：建築構造

キーワード：火山灰 積灰荷重 火山災害 噴火 木造住宅 除灰

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大規模噴火の際には火口周辺では木造建物の倒壊が発生する積灰が予想されることから¹⁾、大量降灰による建物の倒壊および倒壊による人的被害を防ぐための除灰方法の確立は火山防災における降灰対策上の重要課題である。個人が実施する除灰の方法には、3つの方法 — ① 水で洗い流す、② 人力による除去 (ほうき等で掃くまたは、ショベル等で取り除く)、③ エアコンプレッサーで吹き飛ばす — が推奨されているが²⁾、どのような状況で、どの方法が適切であり、どのような手順で実施すべきなのか等は知られておらず実効性に乏しい。また、作業員の数と積載荷重に対する建物の構造安全性はトレードオフの関係にあるので、建物の耐力と作業効率を考慮した作業員数に基づいて除灰計画を決定する必要があるが、そのための基礎資料も整備されていない。除灰作業は労力と費用を要する重労働であることに加え、屋根からの転落の危険性を伴う不慣れた作業となるが、その実施体制は整備されておらず、屋根に堆積した火山灰処理の問題は社会的インパクトも大きい。効果的な除灰方法はリスク評価や安全管理の面からも重要であり、実験に基づく効果的な除灰方法の確立が求められている。

2. 研究の目的

建物の耐力と火山灰の堆積特性を考慮した効果的な除灰方法の確立のための基礎資料の作成を目的として、① 勾配屋根に降下する火山灰の堆積性状の解明、② 建物の耐力と火山灰の堆積特性を考慮した適切な除灰タイミングの評価、③ 除灰作業の運動強度および作業特性の評価、④ 火山灰の湿潤化が積灰荷重に及ぼす影響の解明、⑤ 建物の耐力と火山灰の堆積特性および除灰の運動強度を考慮した除灰方法の提案を行う。

3. 研究の方法

1) 平成 29 年度

屋根に堆積した火山灰の効果的な除灰方法の開発を行うための基礎資料の作成を目的とし、屋根に堆積した火山灰の除灰時の運動強度を測定した。

実験に使用した屋根および器具を写真 1 に示す。屋根の形状は屋根面の桁行方向の長さが 1820mm、流れ方向の長さが 2530mm、勾配が 4 寸 5 分の片流れ屋根である。屋根面には外形寸法が 1232×766×207 mm の箱型容器をはめ込んでおり、箱型容器の上端部分まで火山灰を充填した状態により屋根に堆積した火山灰を模擬的に再現した。

除灰作業はショベルの刃先を屋根に堆積させた火山灰に突き刺してからショベルの全形が火山灰の堆積面の表面から現れるまでの動作である「切り出し」、切り出し後に火山灰を載せたショベルを火山灰の収集位置まで移動させる動作である「運び出し」、運び出しの後にショベルに載せた火山灰を収集用の容器に放り込む動作である「投入」の連続する 3 つの動作で構成した。除灰作業は乾燥状態の火山灰を屋根から切り出して屋根上に設けた収集箇所へ運び出す作業 (以下、乾燥除灰という。)、湿潤状態の火山灰に対して乾燥除灰と同じ一連の動作を行う作業 (以下、湿潤除灰という。)、湿潤状態の火山灰を軒先から地面へ投入する作業 (以下、軒先除灰という。) の 3 種類の除灰作業を実施した。

作業時間はいずれの除灰方法も 18 分間である。除灰作業の経験数が運動強度に与える影響を排除するために各被検者につき 1 回の除灰作業を実施した。また、運動強度に除灰の動機が与える影響を除くことを意図して作業量の目標は指示しなかった。

測定項目は除灰作業中の運動強度とショベリング成績である。運動強度の指標には心拍数と、Borg による主観的運動強度³⁾を用いた。

2) 平成 30 年度

屋根の積灰荷重を評価することを目的として、屋根模型に火山灰を降下させる実験を行って屋根に降下する火山灰重量に対する屋根に堆積する火山灰重量の割合を調べた。

火山灰の降下装置を写真 2 に示す。火山灰の降下装置は火山灰の屋根への自然降下をシミュレートすることを意図して製作した。ふるい装置から落下した火山灰は屋根に降下し、屋根から滑り落ちた火山灰は軒先に置いたトレー内に収集され、その重量が計測される。骨組の周囲は風除けシートで覆い、屋根およびトレーの下には飛散した火山灰を回収できるようにブルーシートを敷いている。屋根模型にはガルバリウム鋼板を一文字葺で葺いた屋根 (以下、ガルバリウム (一文字) という。)、および J 形セメント瓦を引掛葺瓦葺で葺いた屋根 (以下、セメント瓦という。)、の 2 種類を製作した。屋根葺材および勾配の違いによる火山灰の堆積性状を比較するために、堆積ガルバリウム (一文字) の勾配には 2 寸 5 分と 4 寸に勾配を設定し、セメント瓦の勾配には 4 寸と 5 寸を設定した。ふるい装置は厚さ 3mm のアクリル板で製作した上面に蓋のない 50cm×83cm×4.5cm の箱状である (以下、ケースという。)。ケース内は 1 区画が 16cm×16cm の



写真 1 実験装置の構成

領域（以下、セルという。）で軒方向に3区画、流れ方向に5区画の合計15の領域に区画されており、火山灰は各セル内に充填される。また、ケースの底面には火山灰を降下させるための直径4mmの孔が軒方向と流れ方向ともに2cm間隔で開けてあり、対角上にある2つの穴の中間位置にも同径の孔が1つ開けてあり千鳥状になっている。ふるい装置の底面外側には開閉式のシャッターが付いており、火山灰を充填した後シャッターを開いて火山灰を降下させることができる。

1回の降下作業で10kgの火山灰を降下させることができるので、火山灰の充填と降下の操作を10回繰り返し、100kgの火山灰を降下させた。なお、各降下操作の終了後にはスィーパーに残った火山灰を収集して重量を計測し、10回目の降下操作が終了した後はブルーシート上に落下している火山灰も回収して重量を計測し、降下させた火山灰との収支換算により、屋根に堆積した火山灰の重量を求めた。



写真2 火山灰の降下装置

3)平成31年度

建物の耐力と火山灰の堆積性状を考慮した除灰方法を提案することを目的として、積灰荷重に対する木造住宅の構造安全性を許容応力度計算の手法を用いて調べた。また、飽和火山灰を屋根模型に堆積させて14日間の排水実験を行って湿潤火山灰の排水特性について調べた。さらに除灰の際の運動強度と火山灰の堆積性状を総合的に評価して、除灰を開始すべき火山灰の地上堆積厚さを検討した。

在来軸組構法の架構は30棟分の設計図書を開覧して部材寸法等を採用して定めた。固定荷重には建築基準法施行令第84条に記載されている屋根（瓦葺）、母屋（支点間距離4m）、天井（繊維版張）の値を採用した。積灰荷重の設定においては、屋根に堆積する乾燥状態の火山灰の堆積形状に研究代表らが提案した台形モデル⁴⁾を適用した。火山灰重量の算定の際には、2014年に桜島から噴出した火山灰を採取して実測した土粒子の乾燥密度 1.539g/cm^3 と湿潤密度 1.808g/cm^3 を用いた。屋根勾配は4寸5分の場合のみ検討した。湿潤火山灰の排水特性については、乾燥火山灰を24時間水没させて飽和火山灰を作成して90kgの飽和火山灰を瓦屋根とガルバリウム屋根に堆積させた後、14日間の体積含水率を計測した。実験パラメータは屋根勾配、火山灰の粒径分布、屋根の表面形状を設定した。写真3に実験装置の構成を示す。



写真3 排水試験の実験装置の構成

除灰を必要とする火山灰堆積厚さについては、屋根に降下する火山灰重量に対する屋根に堆積する火山灰重量の割合（以下、屋根上堆積率）に基づいて屋根上堆積率を60%に設定し、平成29年度に明かにした1人の作業者がショベルにより火山灰を除灰する際の1時間あたりの除灰量を用いて、実行可能な除灰の作業時間を評価し、除灰を開始すべき地上堆積厚さを求めた。

4. 研究成果

1)平成29年度

表1に除灰作業時の運動強度・主観的強度・ショベル成績を示す。

運動強度、主観的強度、ショベル成績の欄には2つまたは3つの計測値が併記されているが、乾燥除灰時の測定結果を括弧内に記載し、軒先除灰の計測結果をアスタリスク付きの数字で併記している。

ショベルを用いた除灰作業時の運動強度について以下の知見が得られた。

- ①乾燥火山灰を除灰した際の最大心拍数は110～160bpm、湿潤火山灰を除灰した際の最大心拍数は120～150bpmであり、火山灰の湿潤状態による最大心拍数の違いは見られない。
- ②ボルグスケールによる全身の主観的強度は、乾燥火山灰を除灰した場合が14～18、湿潤火山灰を除灰した場合が14～20であり、除灰作業は「きつい」から「非常にきつい」の間の運動強度である。
- ③火山灰の湿潤化および火山灰の投入方法の違いが主観的強度に及ぼす影響は小さい。
- ④除灰作業で最も疲労を感じる部位は腰または背中である場合が多く、全身の疲労度よりも部位の疲労度を強く感じるケースが多い。

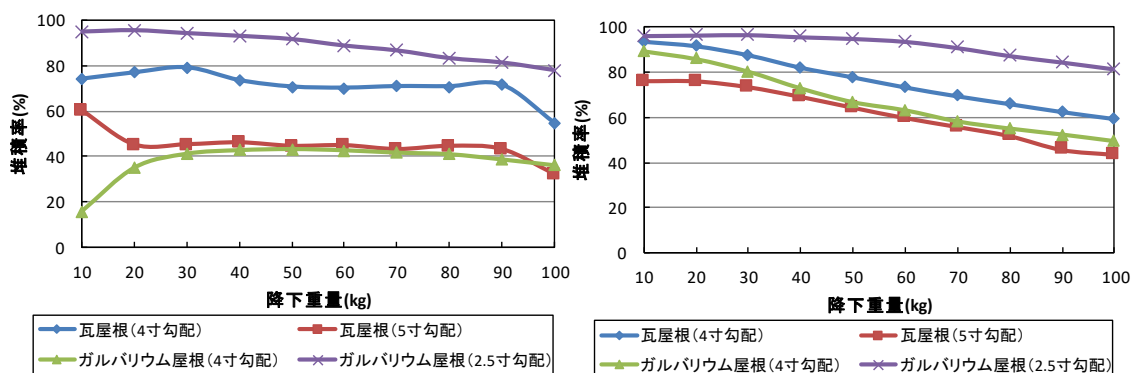
- ⑤除灰作業は被検者の身体的特徴に応じた形で行われていることが推察され、作業手順の指示により作業効率と身体への負荷を制御できる可能性が高い。
- ⑥除灰した火山灰の総重量および除灰に要したショベリングの回数は、湿潤火山灰の除灰の方が乾燥火山灰の除灰時よりも大きくなる。軒先から地面へ火山灰を落として除灰する場合には、より多くの回数のショベリングが必要となる。

表1 運動強度・主観的強度・ショベリング成績

測定項目		被検者A	被検者B	被検者C	被検者D	被検者E	被検者F	被検者G	被検者H	
身体的特徴	握力(kg)	右	36	47	27	34	48	36	50	43
		左	29	46	26	33	41	36	34	40
	背筋力(kg)	70	140	78	100	108	104	107	114	
	BMI	20.0	21.8	19.8	20.8	16.9	22.8	21.5	24.7	
運動強度	最大心拍数(bpm)	—(122)	126(117)	131(127)	124(133)	153(129)167*	138(162)118*	135(107)136*	143(137)130*	
	安静時心拍数(bpm)	73(70)	57(59)	70(65)	69(75)	72(85)77*	69(70)84*	70(65)71*	73(72)75*	
	平均心拍数(bpm)	—(111)	101(102)	104(113)	107(119)	137(108)144*	122(136)107*	107(101)125*	130(122)117*	
主観的強度	疲労部位	腰	18(19)	17(18)	17(18)	16(19)	18(16)15*	16(19)14*	16(19)18*	12(17)15*
		膝	14(13)	13(13)	13(13)	13(13)	13(16)17*	14(14)13*	12(10)12*	13(11)17*
		腕	15(15)	15(13)	13(13)	19(11)	11(19)10*	18(16)14*	18(16)15*	15(12)10*
		背中	—(—)	16(14)	18(14)	19(14)	14(19)16*	15(17)13*	16(15)18*	14(11)16*
		もも	15(17)	13(12)	—(—)	16(18)	19(16)18*	14(13)17*	10(12)10*	15(11)18*
		全身	17(18)	14(15)	17(16)	19(18)	20(18)19*	16(17)15*	16(17)17*	14(14)19*
ショベリング成績	投入重量(kg)	682(445)	692(520)	595(162)	774(329)	868(506)536*	503(407)460*	549(338)564*	495(318)536*	
	投入回数(回)	328(283)	389(372)	351(321)	297(359)	376(217)437*	329(317)371*	306(245)465*	398(248)437*	
	平均投入量(kg/回)	2.08(1.57)	1.78(1.4)	1.69(0.51)	2.61(0.92)	2.31(2.33)1.22*	1.53(1.28)1.24*	1.79(1.38)1.21*	1.24(1.53)1.22*	

2)平成 30 年度

図1に屋根に堆積した火山灰量を火山灰の降下重量に対する屋根に堆積した火山灰重量の割合(以下、堆積率)で示す。ここで、屋根に堆積した火山灰重量は降下させた火山灰重量とトレーに落下した火山灰重量の差から求めている。火山灰の堆積率は、新燃岳(2011)を降下させたガルバリウム屋根(4寸勾配)では30kgの降下まで増加しているが、その他については火山灰の降下量の増加につれて緩やかに低下する傾向を示している。これは火山灰の降下量が増えるにつれ軒先から滑り落ちる火山灰量が増えるためであり、噴火時の火山灰の屋根への堆積には軒先付近での火山灰の落下性状が影響することが分かった。



(a)新燃岳(2011)

(b)新燃岳(2018)

図1 屋根に降下した火山灰の堆積性状

屋根に降下する乾燥火山灰の堆積特性について以下の知見が得られた。

- ①堆積率はガルバリウム(平板)の場合40~80%、セメント瓦の場合30~60%である。
- ②屋根に降下する火山灰は粗粒成分の含有率の高い火山灰の方が堆積しにくく、ガルバリウム(平板)の方がセメント瓦よりも堆積しにくい。
- ③屋根に降下する火山灰は屋根勾配が大きいほど堆積しにくい。

3)平成 31 年度

図2に許容応力度計算により求めた母屋損傷時の降灰荷重と火山灰の堆積厚さの一例を示す。損傷時の積灰荷重は部材寸法が大きいか、または部材間の距離の小さな住宅を除くと3~5kN/m²であった。また、この時の堆積厚さは乾燥状態の火山灰の場合は200~360mm、湿潤状態の火山灰の場合は150~210mmであった。

図3に屋根に堆積させた飽和火山灰の14日間の体積含水率の変化の一例を示す。各測定位置の体積含水率の減少量は3~12%であり、軒先からの自然排水による積灰荷重の減少は期待できないことが分かった。軒先に最も近い位置に配置されたセンサーの体積含水率が高く、センサーの配置位置が棟方向に近いほど体積含水率が高くなることも分かった。新燃岳(2018)に比べ、粗

粒粒子成分の多い新燃岳(2011)の方が14日後の体積含水率は小さかったが、屋根および勾配の違いが体積含水率の低下に及ぼす影響は明瞭でなかった。

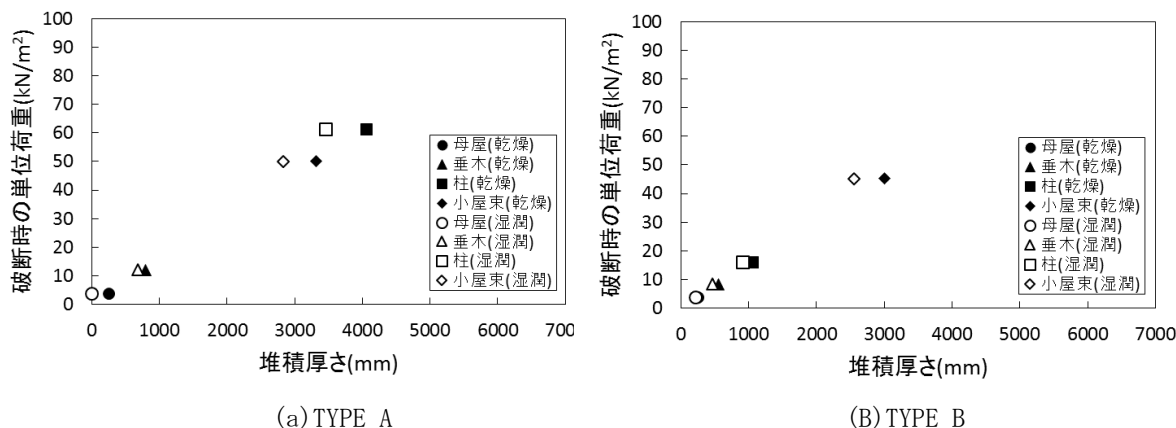


図2 母屋損傷時の降灰荷重と堆積厚さ

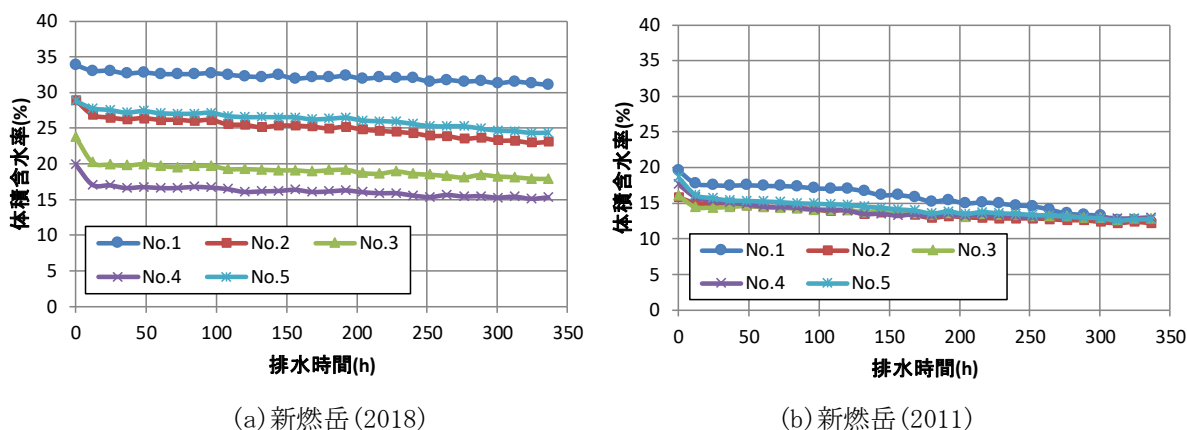


図3 瓦屋根に堆積させた飽和火山灰の体積含水率

(No. 1～No. 3 および No. 5 が1層目のセンサー。軒先から棟部に向かって No. 1, No. 2, No. 3 の順に配置している。)

積灰荷重に対する木造住宅の構造安全性および除灰方法について以下の知見が得られた。

- ①屋根勾配が4寸5分の屋根に火山灰が堆積した場合、降灰荷重が3～5kN/m²に達すると母屋の損傷が見られる。この時の堆積厚さは、密度が1.539g/cm³の乾燥状態の火山灰の場合は200～360mmであり、密度が1.808g/cm³の湿潤状態の火山灰の場合は150～210mmである。
- ②屋根に堆積した乾燥状態の火山灰の重量により屋根が損傷する時の堆積厚さは、一般に火山防災マップに記載される大規模噴火が発生した場合に警戒を要する火口近辺の地上堆積厚さと同程度であり、積灰荷重による木造住宅の倒壊を想定した避難計画の立案が必要である。一方、湿潤状態の火山灰が堆積した場合は屋根が損傷する時の堆積厚さは火山防災マップに記載された地上堆積厚さよりも小さくなるのでリスク情報の周知の際には特に注意が必要である。
- ③屋根に堆積した火山灰の除灰を開始する目安となる火山灰の地上堆積厚さは20cmである。
- ④除灰の際には火山灰に水分を与えてから作業をする方が効率は良い。また目標値や作業手順等の指示により作業負荷と除灰量をコントロールして除灰計画を実施するのが望ましい。
- ⑤屋根に堆積した湿潤火山灰の軒先からの排水による積灰荷重の減少は期待できない。降雨等による湿潤化の際には速やかに除灰を実施すべきである。
- ⑥屋根に堆積した湿潤火山灰は堆積層内の水分の移動により軒先部分の重量が大きくなる。湿潤化した火山灰の除灰は軒先部分から実施するのがよい。

参考文献

- 1) 例えば、桜島広域火山防災マップ、桜島火山防災検討委員会火山防災啓発検討部会、2007。
- 2) 火山灰への備え 事前の準備、事後の対応 (日本語版)、(独)防災科学技術研究所、2007。
- 3) Borg, G.A.,: Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine, 2, 92-98, 1970。
- 4) 山本 剛, 井上正文 : 木造住宅の屋根に堆積した火山灰の滑動に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 724号, pp.959-969, 2016。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本 剛
2. 発表標題 木造住宅の屋根に堆積した火山灰の除灰方法に関する研究 その2. 屋根に堆積した火山灰の除灰作業時の運動強度の測定
3. 学会等名 2018年度 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 剛
2. 発表標題 木造住宅の屋根に降下する火山灰の堆積性状
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会（北陸）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 剛
2. 発表標題 木造住宅の屋根に堆積した火山灰の除灰方法に関する研究 その1. 地上に堆積した火山灰の除灰作業時の運動強度の測定
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Yamamoto
2. 発表標題 IMPACT OF VOLCANIC ASH FALL ON SEISMIC PERFORMANCE OF TIMBER-FRAMED BUILDINGS
3. 学会等名 2018 World Conference on Timber Engineering Aug. 20-23, 2018 Seoul, Rep. of Korea (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----