

## 火山観測機器を用いた土石流の量的検出

### Quantitative detection of debris flow by using tilt and strain meters

\*井口 正人<sup>1</sup>

\*Masato Iguchi<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所火山活動研究センター

1. Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

#### はじめに

火山噴火発生後には、降雨によってしばしば土石流が発生する。降下火山灰や火砕流などの可動性の高い物質が山麓に堆積され、多量の水によって流動する。これまで、土石流の検知はワイヤーセンサーや水位計などに加えて、より安定的に稼働しうるものとして振動センサーが用いられてきた。ここでは、より定量的な土石流の見積もりが可能となる傾斜計やひずみ計などの地盤変動センサーによって土石流を検知できたので、それについて報告する。

一般に、火山噴火に前駆して火山体の膨張が捉えられる。桜島の昭和火口の爆発の場合、火口から2.1km南南東にある有村観測坑道の水管傾斜計により、1時間から最長1日半前に火口方向の隆起の変化が観測され、噴火の発生と同時に沈降傾斜に反転する。火口側隆起の傾斜変動は、有村観測坑道からみて火口方向と反対側にある有村川における土石流発生時にも観測される。土石流は降雨時にしか発生しないので、強い降雨時であれば、土石流の発生の可能性を疑うが、火山噴火は降雨とは関係のない現象なので、降雨の有無は隆起傾斜変化の原因の判定の根拠にはなりにくい。ここでは、土石流発生時の地盤変動の特徴を抽出し、火山爆発に前駆する地盤変動との相違を明らかにし、点荷重モデルを用いて、荷重増加量を見積もった。

#### 傾斜及びひずみ変化

傾斜計及び伸縮計は昭和火口から2.1km南南東の有村観測坑道内に設置され、さらに南0.4kmに有村川がある。有村川では2009年以降、昭和火口において爆発が頻発するようになってから土石流の発生回数が増加しており、2009年から2016年までに65回の土石流が発生している（大隅河川国道事務所調べ）。土石流発生時に地盤変動がなかった例はわずか4例しかなく、ほとんどの場合、地盤変動を伴う。傾斜変化量は火口側隆起の4~409ナノラジアンである。爆発に前駆する傾斜変化は100ナノラジアン以下で、土石流発生時の方が大きい変化が観測される場合がある。火口側隆起は有村川側の沈降を意味し、沈降ベクトルの方向は、有村川の最上流部の1号堰堤の方向を向くので、堰堤への土砂堆積による荷重沈降が地盤変動を引き起こしたものと解釈できる。また、地盤変動は土石流流下による振動の振幅がピークに達した時点で始まる。振動振幅のピークは土石流先端が観測点に最も接近したことを意味し、土石流堆積による荷重沈降が地盤変動の理由として考えやすい。火口方向のひずみ変化量は3~138ナノストレインの伸長である。火山爆発に先行する地盤変動では、火口方向のひずみは収縮を示すので、土石流発生時の極性とは異なる。また、昭和火口の爆発の場合、傾斜変化量よりひずみ変化量が大きい、土石流発生時の傾斜変化量はひずみ変化量の3倍程度大きい。傾斜とひずみの比3は点荷重を仮定し、ラメの定数 $\lambda = \mu$ とした場合の傾斜とひずみ変化の比に相当する。

#### 土石流堆積量の見積もり

点荷重モデルを用いて、荷重増加量を見積もってみる。例えば、30ナノストレインの収縮ひずみが検知された場合、 $6 \times 10^8 \text{ N}$ の力が働くので重量にして $6 \times 10^7 \text{ Kg}$ 、体積にして $25,000 \text{ m}^3$ の土砂が堆積したことになる。2009年から2016年までの土石流に伴う総ひずみ変化量は1100ナノストレインであり、8年間におよそ200万トン（ $80 \text{ 万 m}^3$ ）の土砂が運ばれてきたことになる。2009年から2016年までの噴出物量は4300万トンと見積もられており、総噴出物量の5%が土石流として有村川に流下したことになる。

キーワード：地盤変動、土石流、桜島

Keywords: ground deformation, debris flow, Sakurajima

## Rainfall-runoff-inundation model application for volcanic debris flow assessment in Mount Merapi

\*Magfira Syarifuddin<sup>1</sup>, Satoru Oishi<sup>2</sup>, Ratih Indri Hapsari<sup>3</sup>, Djoko Legono<sup>4</sup>, Masahide Muranishi<sup>1</sup>, Mariko Ogawa<sup>5</sup>, Masato Iguchi<sup>6</sup>

1. Graduate School of Engineering, Kobe University, Japan, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, Indonesia, 3. State Polytechnic of Malang, Indonesia, 4. Gadjah Mada University, Indonesia, 5. Office of Promoting Regional Partnership, Kobe University, Japan, 6. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

Volcanic debris flow or lahar is a hydrometeorological disaster happened in the rainy season in Mount Merapi. Following the 2010 eruptions more than 50 lahar events happened and caused material loss and casualties. Although the frequencies are decreasing, but in 2016 the disaster still happened as the unstable material from the volcano eruption remains at elevation higher than 1200 m above mean sea level (amsl).

Lahar is a Javanese term used to describe a rapidly flowing, high concentration, poorly sorted sediment-laden mixture of rock debris and water from a volcano that goes along river stream. It is a continuum flow type which covers debris flows, hyperconcentrated, streamflow, and mudflows. It comes as series of surges with maximum frontal velocity ranges from 5 m/s to 15 m/s. At Merapi lahar is likely to trigger by rainfall intensity of 40 mm in 2 h. Two types of triggering rainfall are: local stationary or orographic confined to slopes above 1200 m amsl and regional, migratory rainfall that moves from the northwest or the southwest. The latest mention usually leads to large-scale debris flow (>80,000 m<sup>3</sup> of deposits) (Lavigne et al. 2007).

Hydrological model such as rainfall-runoff-inundation (RRI) could be a useful tool for analyzing hydrometeorological disaster. The model uses full dynamic equations that based on diffusion wave assumption which are effective for flood assessment in both mountainous slopes and lowland plains. However, the application on flash-flood and debris flow is difficult because of the short duration and small area. The RRI model relies on satellite-rainfall and rain gauge data, while lahar occurs in a small-scale that constrained the use of coarse resolution of satellite-rainfall or poor resolution rain gauge network.

Previous studies confirmed that rain gauge-rainfall caused uncertainties and underestimated rainfall threshold for debris flow occurrence (Nikolopaulus et al., 2014; Staley et al., 2013; Marra et al., 2014). On the other hand, remote monitoring by weather radar such as an X-band multi parameter (X-MP) radar gives higher spatial and temporal resolution, which is desirable by lahar studies. It offers advantage to monitor rainfall in the initiation area and it could measure debris flow during short duration of storm event (David-Novak et al., 2004; Chiang and Chang, 2009).

In this paper, we improved the RRI model by applying X-MP radar information. A new submodule of debris flow assessment has also been introduced based on Takahashi theory (Takahashi, 2009). The theory considers debris flow initiation criteria depends on average slope, particle size and discharge per unit width. We used the improved model to analyze hydrologic condition in Gendol Catchment for 2 weeks observation in May 2016.

The radar-rainfall based model gave comparable results with the rain gauge-rainfall based model and the

observed water depth information in the downstream area. The discharge information calculated by RRI model were not only useful for direct lahar assessment but could be important boundary information for other numerical model in ungauged sub-basin. Although direct verification in the ungauged upstream area is difficult, but in the future applying the model for real lahar event could be useful to test the improved RRI model performance in small-scale catchment.

Keywords: Rainfall-runoff-inundation model, X-MP radar, volcanic debris flow, rainfall, merapi

## 岩手山における火山体構造探査プロジェクト

### Detecting interior structure in Iwate volcano using muon radiography.

\*伊藤 英之<sup>1</sup>、角野 秀一<sup>2</sup>、辻 盛生<sup>1</sup>、市川 星磨<sup>2</sup>、高崎 史彦<sup>3</sup>、成田 晋也<sup>4</sup>

\*Hideyuki Itoh<sup>1</sup>, Hidekazu Kakuno<sup>2</sup>, Morio Tsuji<sup>1</sup>, Seima Ichikawa<sup>2</sup>, Fumihiko Takasaki<sup>3</sup>, Shinya Narita<sup>4</sup>

1. 岩手県立大学総合政策学部総合政策学科、2. 首都大学東京理工学研究科、3. 高エネルギー加速器研究機構、4. 岩手大学大学院理工学研究科

1. Faculty of policy studies, Iwate prefectural University, 2. Department of Physics, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University, 3. HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION, 4. Department of Physics, Graduate School of Science and Engineering, Iwate University

近年、宇宙線ミュオンを用いた火山体内部の透視技術が確立され、浅間山、薩摩硫黄島などで成果を出している (Tanaka, et.al 2008)。我々は、岩手山山頂から約6km東麓に位置している国立岩手山青少年交流の家にミュオン測定機を設置し、2016年10月14日より観測を実施している。合わせて、岩手山起源の湧水の化学組成について連続観測を行い、ミュオグラフィーから得られる山体内部構造のイメージとあわせ、火山体内部の深部地下水流動系の解明を目指している。

現在のデータの取得状況は安定しており、二次元の簡易イメージは得られている状況にある。しかしながら、測定から得られる山の密度長は実際の山の厚さとはかけ離れた値を示しており、電磁シャワーや周囲からの散乱によって入ってきたミュオンによる影響が大きい。一方、数値地図火山標高10mメッシュを用いて、実測密度長と地形データの距離との比を取り、密度分布にすると、北側と南側で濃淡が異なってくることから、今後はバックグラウンドを仮定して、山体の密度分布を把握していく予定である。

一方、湧水の化学組成から、岩手山麓の湧水の多くはCa(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>型であるが、北麓の金沢湧水と北東麓の生出湧水では、Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>に加えSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の濃度が高い。これらの湧水についてトリチウム年代を測定したところ、13.9~23.5年の値が得られた。特に生出、金沢湧水については、それぞれ19.4年、23.5年の測定値が得られ、1998~2003年岩手山噴火危機の頃に涵養された地下水が今後湧出してくる可能性が示唆された。

キーワード：ミュオン、湧水、化学組成

Keywords: muon, spring water, chemical analysis

## 近年の霧島硫黄山の活動に伴う低温噴気活動と地表面からの硫化水素拡散放出現象

### Low-temperature fumaroles and diffuse H<sub>2</sub>S degassing associated with recent volcanic activity at Iwo-Yama, Kirishima Volcanoes, Japan

\*木川田 喜一<sup>1</sup>

\*Yoshikazu Kikawada<sup>1</sup>

1. 上智大学理工学部

1. Faculty of Science and Technology, Sophia University

霧島山系の硫黄山では2013年12月以降、火山性地震が増えるなど活動活発化の兆候が認められ、2015年12月には火口内に噴気が認められるようになった。その後、噴気活動はさらに活発化を見せ、火口周辺に熱異常域が広がるに至っている。この火口域の噴気活動に伴うように、山頂西側外斜面からその下方にかけて、高濃度に硫化水素を含む、噴気を伴わない低温ガス放出域も認められるようになった。この低温ガス放出域はかつて噴気活動のあった酸性変質地帯内にあるが、現状では噴気も熱異常も確認できず、火山ガスが地表面から拡散放出しているものと見られる。また、変質地帯内にはこの火山ガス放出に関係すると思われる、溶存硫化水素濃度が高く、湧出後に硫黄の沈殿が析出する小規模な酸性湧水の存在が認められる。

硫黄山は多くの観光客・登山客が訪れる「えびの高原」に位置し、噴気地帯や低温ガス放出域は観光客が多く利用する県道や登山道・遊歩道に接している。このため宮崎県は、2016年3月から定期的に噴気地帯および低温ガス放出域での硫化水素ならびに二酸化硫黄の大気中濃度測定を実施している。当初は地表30 cmで200 ppmを越えることのなかった低温ガス放出域内の大気中硫化水素濃度は、2016年10月以降急上昇し、最大1400 ppmが観測されるに至った。宮崎県は火山ガス濃度に応じた道路ならびに登山道・遊歩道の規制方針を策定し、2017年1月からは低温ガス放出域の定点2カ所において硫化水素濃度の自動測定も開始した。

講演者は宮崎県とともに2016年3月以降、観光客の安全確保の観点から硫黄山における大気中硫化水素濃度の変化を見守っており、講演では硫化水素濃度の極めて高い低温噴気活動および火山ガス放出現象の推移を報告するとともに、宮崎県ならびに地域コミュニティによる火山ガス防災への取り組みについて紹介する。

キーワード：霧島硫黄山、硫化水素、火山ガス災害、低温噴気、えびの高原、ガス中毒

Keywords: Iwo-Yama, hydrogen sulfide, volcanic gas disaster, low-temperature fumarole, Ebino Highland, gas poisoning

## 箱根山の火山防災と2015年噴火

### Critical review of disaster mitigation for Hakone Volcano and its eruption occurred in 2015

\*小山 真人<sup>1</sup>

\*Masato Koyama<sup>1</sup>

1. 静岡大学防災総合センター

1. CIREN, Shizuoka Univ.

小山（2017, 科学）は、かつて箱根火山防災マップ作成検討委員会委員をつとめた外部専門家の立場から、箱根山の火山防災に関連した歴史をふりかえるとともに、2015年噴火への当事者や社会の対応を記録し、気づいた点を論じた。本講演では、そのエッセンスを紹介するとともに、紙数の関係で書けなかった総括的な考察と評価をおこなう。

箱根火山の2015年噴火はごく小規模であったが、過去3000年間に5度生じたことが知られる本格的な水蒸気噴火に発展する可能性も十分あった。箱根町火山防災マップ（2004年）は、こうした水蒸気噴火による火山弾・火山礫の飛散や火砕サージ・熱泥流の発生を想定し、それらの危険範囲を描いている。その後、2008年の噴火警戒レベル導入にともなって設立された箱根火山対策連絡会議（後の箱根火山防災協議会）は、箱根町火山防災マップをベースとして噴火警戒レベルの各段階での規制範囲を定め、大涌谷地区の避難計画も事前に作成していた。つまり、防災対応システムの大枠が事前にできていた（間に合った）ことと、幸運にも次の3つの自然的要因が重なったために、2015年噴火に対する緊急対応の成功に至ったと評価できる。

(1) 噴気異常の発生（5月3日）から噴火開始（6月29日）までの時間が長く、噴火自体も2日程度の短期間で終了したこと

(2) 発生した水蒸気噴火の噴出量は100トン程度とごく小規模、噴火に付随した熱泥流もごく小規模、爆発力も弱く火山弾や火山礫の飛散は火口近傍に限られ、火砕サージも発生しなかったこと

(3) マグマ噴火に発展しなかったこと

しかしながら、20世紀初めから2015年噴火に至る箱根山の火山防災にかかわる歴史を振り返ると、2015年時点の防災体制を構築するまでにはいくつかの岐路があり、各時点でプラスに働いた（かもしれない）社会的要因とマイナスに働いた（かもしれない）社会的要因を挙げることができる。プラスに働いた（働いたかもしれない）社会的要因としては、

(1) 大涌谷の蒸気井と温泉供給会社の存在と活動

(2) 箱根町と火山学会との連携、ならびに大涌谷自然科学館の設置と活動

(3) 地元の火山観測・研究機関（神奈川県温泉地学研究所）の存在と活動

(4) 2001年群発地震・噴気異常の経験とその教訓

(5) 箱根火山の噴火史、とくに大涌谷付近での水蒸気噴火の履歴に関する研究成果の蓄積

(6) 群発地震・噴気異常の発生シナリオ・メカニズムについての学術的知見

(7) 箱根町火山防災マップの作成とその過程で得られた教訓

(8) 噴火警戒レベルの導入とそれにとまなう箱根火山対策連絡会議の設置と活動

(9) 箱根火山防災協議会（現・箱根山火山防災協議会）の設置と活動

(10) 箱根ジオパークの設置とその普及・啓発活動

の10項目が挙げられる。また、マイナスに働いた（働いたかもしれない）社会的要因としては、

(1) 開発された温泉観光地ゆえのリスク情報公開への躊躇

(2) 大涌谷自然科学館の閉館

(3) 箱根町火山防災マップ作成過程での噴火想定限定（マグマ噴火ならびに大涌谷周辺以外の火口を想定せず）

- (4) 噴火警戒レベル判定基準への固執（レベル2へ上げる判断の遅れ）
- (5) リスク情報（危険範囲、火山ガス濃度）共有の部分的失敗
- (6) 噴火シナリオ（および各シナリオの確率推定）の不在
- (7) 噴火認定の失敗（噴火警戒レベル3へ上げる判断の遅れ）
- (8) 不透明な意思決定
- (9) 地元行政・経済への過度の忖度
- (10) 政治家の不当な介入
- (11) ジオパークとの連携不十分

の11項目を挙げることができるだろう。箱根山2015年噴火の緊急対応「成功」の影には、上記した自然的要因の幸運の上に、過去数十年間にわたって上記のプラス要因をうまく利用し、危ない橋を渡りつつもマイナス要因を抑制してきた当事者たちのたゆまぬ努力があったと認識できる。

キーワード：箱根火山、防災、2015年噴火、批判的レビュー、自然的条件と社会的条件、プラス・マイナス要因

Keywords: Hakone Volcano, disaster mitigation, 2015 eruption, critical review, natural and social conditions, plus and minus factors

## クラカタウ1883噴火の準備過程

### -カルデラ噴火の前兆はつかめるか？-

## Review on pre-cursor events of Krakatau 1883 caldera-forming eruption

### -Can we catch the precursor events of caldera-forming eruption?-

\*高田 亮<sup>1</sup>

\*Akira Takada<sup>1</sup>

1. 活断層火山研究部門

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Geological Survey of Japan

カルデラ形成を伴う大規模噴火、またはそれに準ずるVEIで6以上の噴火は、既存のDB (Seibert et al., 2010) によれば、100年に1-2回程度発生している。しかし、平均値とは異なり、インドネシアだけで最近200年間で3回のカルデラ噴火を経験している。本発表では、その中で、比較的最近の情報が多く残る Krakatau 1883のカルデラ噴火について、前兆現象を文献(Nishimura, 1980, Yokoyama, 1981, Simkin and Fiske, 1983; Carey et al., 1996; Mandeville et al., 1996)などでレビューし(Takada, 2010; Takada et al., 2012), また、現地での巡検視察 (1996, 2006) などをもとに考察する。Krakatau火山は、ジャワ版「列王記」で、西暦416年の噴火記録があるが詳細は定かでない。1596年のスケッチでは、1883年噴火直前の火山島とほぼ同じ形が描かれていた。1680年には爆発的噴火が起こったことが銅版画で残されている、18世紀以後は、1883年の噴火まで噴火記録はなく、樹木に覆われた島は農地や硫黄採掘、温泉などとして利用されていた。クライマックスである1883年8月27日に先立つ3ヶ月半以上前の5月より有感地震が起こった。1883年噴火の前兆現象として、広範囲に噴気孔が広がっていく異常現象がとらえられていた。5月20日には噴煙が約11km上がった。爆発音、振動、少量の降灰が記録されている。5月22日には間歇的な灰噴火が起こり、海面には軽石が浮遊した。また、5月27-28日には、観光ツアーが島を訪れ、北側の噴火口の様子を報告した。その後も、6月に入り役人やオランダの軍人が上陸し観察記録を残している。6月-7月は、2箇所から噴煙が上がっていたが、8月11-12日には、オランダの大尉が上陸すると、約5kmの範囲で3箇所の噴火口と14箇所の噴気孔を確認していた。クライマックスは、8月26日の早朝から始まり、14時に爆裂とともに噴煙中が26km上がったと記録されている。27日には、早朝から4回の噴煙柱が立ち上がり、最高で38kmに達したと言われている。それに伴う津波も発生し、被害を拡大した。火砕流や火砕サージも発生し、対岸の集落を襲った。この噴火で約12km<sup>3</sup>のマグマが噴出したと報告されている (Carey et al., 1996)。

本研究は、原子力規制庁からの受託研究として行われた。

キーワード：クラカタウ、カルデラ噴火、大規模噴火、噴火前兆現象、インドネシア

Keywords: Krakatau, caldera-forming eruption, large volume eruption, precursor events, Indonesia

# Physical parameters analysis of volcanic ash particles measured by 2D-Video Disdrometer

\*Sung-Ho Suh<sup>1</sup>, Masayuki Maki<sup>2</sup>, Masato Iguchi<sup>3</sup>, Dong-In Lee<sup>1</sup>

1. Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Korea, 2. Research and Education Center for Natural Hazards, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima, Japan, 3. Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Sakurajima, Kagoshima, Japan

Weather radar is one of powerful instruments for measuring volcanic ash columns and ash clouds. However, we need fundamental physical properties on ash particles for the quantitative analysis of weather radar data of volcanic ash: necessary information are terminal velocity, axis ratio, and canting angle including density and dielectric constant of target to detect volcanic ash column correctly. In the present study, the basic features of volcanic ash particles are analyzed to develop quantitative ash fall estimations (QAEs).

The data were collected by a number of automatic tephrometers at Sakurajima volcano, Japan and reanalyzed with a 2D-video disdrometer (2DVD) in the large-scale rainfall simulator of NIED. The entire volcanic ash particles were classified as five types based on shape and orientation: Horizontal Oblate (OH), Vertical Oblate (OV), Horizontal Prolate (PH), Vertical Prolate (PV), and Sphere (Sp). Dominant particle shape was OH (71.5%) and the next was PH (17.0%). It should be noted the horizontally oriented type was 88.7% of all sampled data. The 64.4% data are concentrated on  $D < 0.5$  mm. The number of PV and Sp particle is increased with  $D$ . The relationships of terminal velocity are dependent on particle shape types: Prolate spheroid (vertical orientation) particles were faster than those of oblate (horizontal). The distribution of  $\gamma$  is from 0 to 1.5 at  $D < 2$  mm, but these are concentrated to around 1 for  $D > 2$  mm. The deviation of canting angle for OV (OH) is around two times larger (smaller) than raindrops. It is inferred that there would be not much rotating phenomenon. The features of ZH and dual-pol radar variables (ZDR, KDP, and AH) were analyzed. ZH is around 4.3 dBZ smaller than that of raindrop and there is no resonance effects with radar frequency. There are large variabilities in ZDR depending on the particles shape for  $D < 2$ mm and these were close to 0 for  $D > 2$ mm. KDP and AH are variable with radar frequency but these magnitudes are almost 0 regardless of  $D$ . These results will be utilized to develop QAE methods, to detect volcanic ash column and predict its activity.

Corresponding author: M. Maki

Acknowledgment: This work was supported the Grant-in Aid for Scientific Research (A) 24244069 of MEXT, Japan, Invitation Program of Foreign Researchers of Kyoto University and the Korea Meteorological Industry Promotion Agency under Grant KMIPA 2015-1050 and the BK21 plus Project of the Graduate School of Earth Environmental Hazard System. 2DVD data were provided by MEXT, Japan. We also thanks to NIED for the experiments in the large-rainfall simulator in Tsukuba, Japan.

Keywords: Volcanic ash, basic feature, 2DVD

# Orographic Effects on the Transport and Deposition of Volcanic Ash - A Sakurajima Case Study

\*Alexandros Panagiotis Poulidis<sup>1</sup>, Tetsuya Takemi<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>1</sup>, Ian Alasdair Renfrew<sup>2</sup>

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Centre for Ocean and Atmospheric Sciences, University of East Anglia

## *Introduction*

Volcanic ash is a major environmental hazard that acts over both short (hours-days) and long (months-years) timescales and, directly or indirectly, affects life, livelihoods, and infrastructure (Wilson *et al.*, 2015). After an eruption, airborne ash can cause major disruption for international aviation, and in the long term can exacerbate existing respiratory conditions (Hillman *et al.*, 2012). Accurate prediction of the transport and deposition of volcanic ash is therefore vitally important for hazard management and mitigation.

Transport and deposition of volcanic ash are complex processes, depending heavily on the size of the particles (Bonadonna and Houghton, 2005). Heavy ash is deposited quickly within a few 10s of kilometers from the vent, while lighter ash tends to have longer flight times and is more directly influenced by local as well as regional wind fields. Atmospheric flow is heavily influenced by complex terrain creating a number of complex phenomena, such as flow spitting, gravity waves and downslope winds (Smith, 1980). These orographic effects have been seen to affect the deposition of volcanic ash (Watt *et al.*, 2015)

In the study presented we examined the impact of orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash from the Sakurajima volcano in Kyushu, Japan. Sakurajima is one of Japan's most active and closely monitored volcanoes. The frequent activity, surrounding mountainous topography, and large amount of observational data make Sakurajima an ideal natural laboratory for the study of these effects.

## *The August 2013 eruption and ash dispersal modelling*

On 18th August 2013 Sakurajima erupted at 1631 JST with a plume height of 5 km - the highest plume height recorded since 2006. Ash was advected W-NW and ashfall was recorded as far as the Koshikijima islands 90 km in the west. This eruption was studied in depth using the Weather Research and Forecasting (WRF) model (Skamarock *et al.*, 2008), coupled with "online" chemistry and aerosol calculations (WRF-chem; Grell *et al.*, 2005). A nested domain setting with high horizontal (12500, 2500, and 500 m) and vertical (90 levels starting at 50 m height increments) resolution was used in order to resolve the orographic effects, while a series of simulations with zero topography were carried out to show the influence of these effects.

## *Results*

Simulations have shown that orographic effects can act in two ways: strong gravity wave activity close to

the volcano act to keep ash afloat, while downslope winds closer to the surface can advect ash downwards and force deposition (Fig. 1; Poulidis *et al.*, 2017). Orographic effects were seen to increase both horizontal and vertical diffusion of volcanic ash. Due to its low residence time, heavy ash was seen to be relatively unaffected by orographic effects: in terms of deposition, the most readily affected size ranges for particles were of grain size between 3-5  $\phi$  (ie. between 0.125 and 0.03 mm).

Resolving orographic effects over the volcano leads to a “gray area” over the volcano: the initial plume height set at input can be changed due to gravity wave activity over the volcano, leading to a different simulated plume height, something that could affect similar simulations, especially for eruptions with low plume heights.

## References

Bonadonna and Houghton, (2005), *Bull. Volcanol.*, doi:10.1007/s00445-004-0386-2

Grell *et al.*, (2005), *Atmos. Environ.*, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.

Hillman *et al.*, (2012), *Bull. Volcanol.*, doi:10.1007/s00445-012-0575-3.

Iguchi, (2016), *J. Disaster. Res.*

Poulidis *et al.*, (2017), *J. Geophys. Res.* (In preparation)

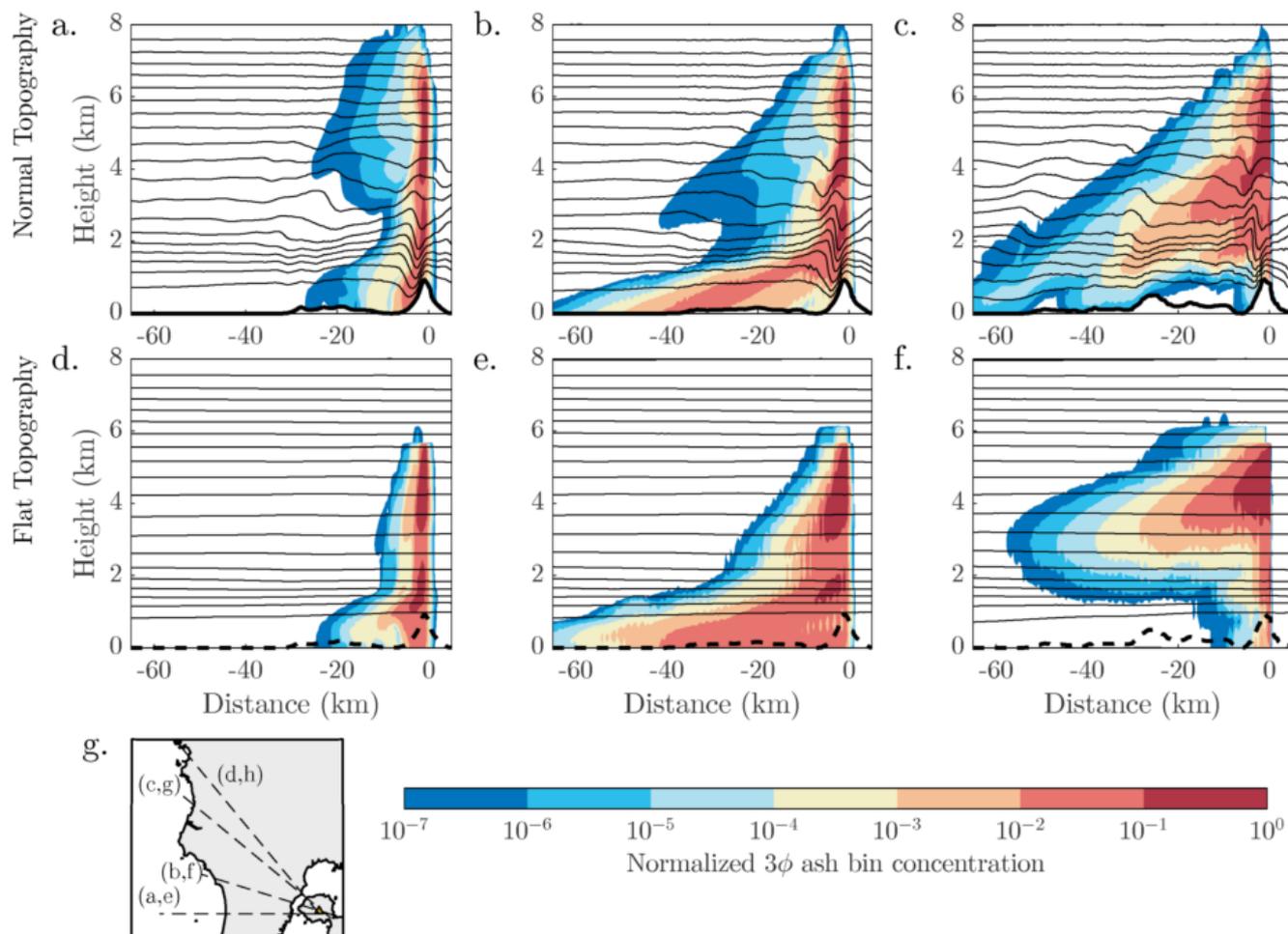
Skamarock *et al.*, (2008), *Tech. rep.*, NCAR/TN-4751STR.

Smith *et al.*, (1980), *Tellus*, doi:10.1111/j.2153-3490.1980.tb00962.x.

Watt *et al.*, (2015), *Bull. Volcanol.*, doi:10.1007/s00445-015-0927-x.

Wilson *et al.*, (2015), *Phys. Chem. Earth*, doi:10.1016/j.pce.2011.06.006.

Keywords: Ash dispersal, Sakurajima, WRF, Orographic effects



# 降下火山灰シミュレーションソフトによる地球惑星科学教育の試み Attempt of earth and planetary science education by dispersion simulation of pyroclastic materials emitted from the volcanic eruption

\*佐伯 和人<sup>1</sup>

\*Kazuto Saiki<sup>1</sup>

1. 大阪大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Osaka University

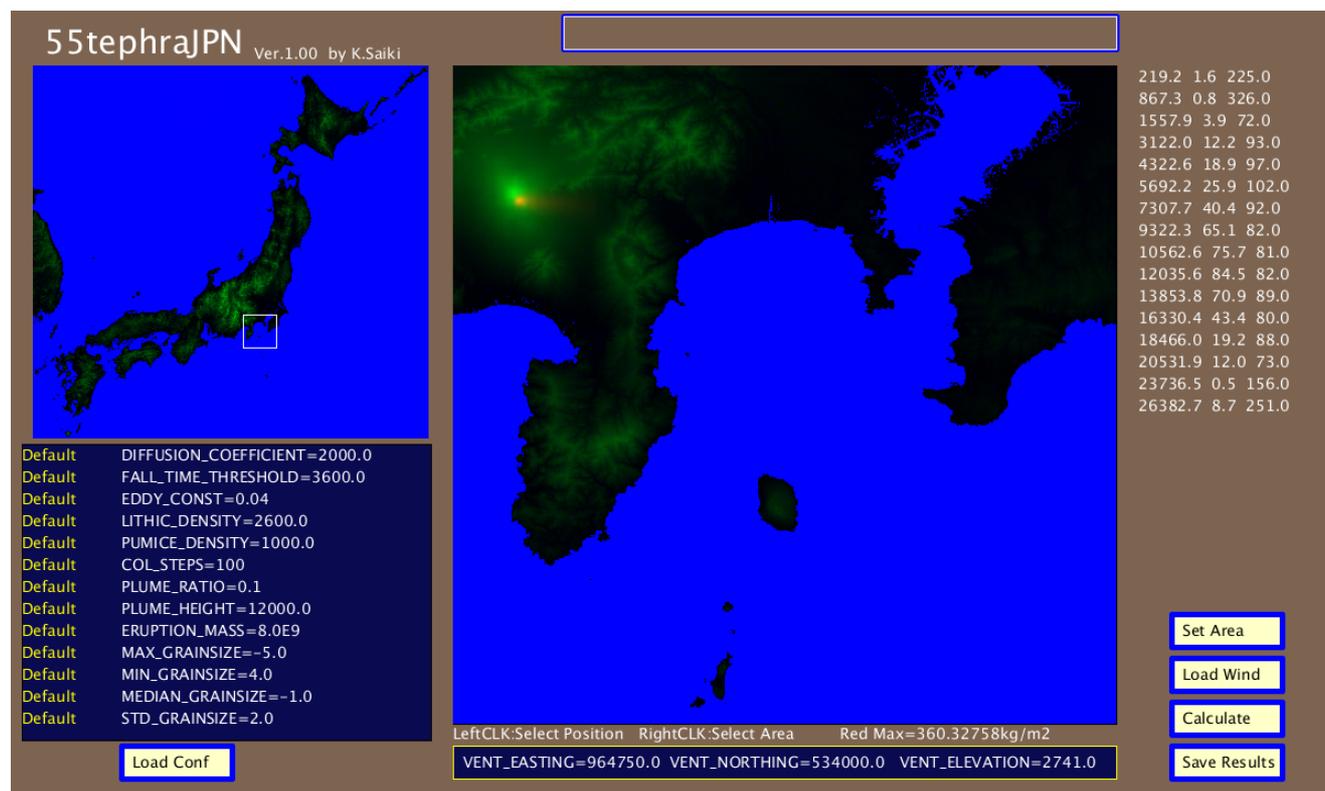
近年、火山噴火によって放出される火砕物の堆積シミュレーションが活発に行われ、防災ハザードマップ等に活用されている。中でもよく使われているTephra2（文献1、2）は火砕物の大気中での移流+拡散モデルをベースとしており、内部の処理が理解しやすく、計算機リソースもあまり必要としない、手軽なシミュレーションプログラムである。このTephra2をベースに、さらにコンパクトにし、使いやすく、コードのリーディングや改造もしやすい55Tephra（図1）というシミュレーションプログラムを作成した。この55Tephraを自然現象のモデル化の考え方や注意する点を学ぶための教材として、高校生を対象に使うことを計画している。地球の火山だけでなく、火星等、地球外火山噴火のシミュレーションに興味をもつ高校もあり、地球惑星科学の教材としながら、自然に防災の感覚も身につく教材となる可能性があると期待している。発表では、55Tephraの紹介と、さまざまな活用のアイデアを提示する。

(1) Bonadonna, C et al. (2005) JGR, 110, B03203.

(2) 萬年一剛 (2013) 第四紀研究 52(4) p.173-187.

キーワード：テフラ、シミュレーション、高校生

Keywords: tephra, simulation, high school students



## Features of Numerical Model “Ballista” ; the Ballistic Simulator of Explosive Volcanic Eruption

\*常松 佳恵<sup>1</sup>、ゴメス クリストファー<sup>2</sup>、レベッカ フィッツジェラルド<sup>3</sup>、ベン ケネディー<sup>3</sup>、山岡 耕春<sup>4</sup>

\*Kae Tsunematsu<sup>1</sup>, Christopher A Gomez<sup>2</sup>, Rebecca Hanna Fitzgerald<sup>3</sup>, Ben Matthew Kennedy<sup>3</sup>, Koshun Yamaoka<sup>4</sup>

1. 山梨県富士山科学研究所、2. 神戸大学海事科学部海事科学研究科、3. カンタベリー大学地質学科、4. 名古屋大学大学院環境学研究科

1. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government, JAPAN, 2. Faculty of Maritime Sciences, Kobe University, JAPAN, 3. Department of Geological Sciences, University of Canterbury, New Zealand, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, JAPAN

Ballistic projectiles are emitted from the vent of the volcano when an explosive eruption occurs. Their sizes range from a few centimeters to several meters, and the landing velocity of these pyroclasts can exceed 100 km/h. Therefore, for hazards and disaster risk management it is essential to estimate the affected area of ballistic projectiles. To reach this goal the ballistic trajectory simulator “Ballista” was developed. This model can calculate the trajectory and deposition condition of multiple ballistic particles in three dimensions using a momentum equation including air friction solved by the Runge-Kutta method, and particles are transported by the Lagrangian method. Ballista was programmed using Java to increase portability and includes complementary modules, such as a topographic effect, which is also taken into account by the simulation. As a result, the model can constrain the ejection angle and direction bearing of ballistic projectiles released during the Ontake 2014 eruption (Tsunematsu et al., 2014), not only using ballistic physics but also realistic terrain data.

In the presentation, we show how local conditions and terrain can affect the model by running the same simulations with and without topography, but also by modifying the resolution of the topography to study these effects. The resolution of the digital elevation model (DEM) only changes the large scale distribution of ballistics on the ground when the grid size is fairly large (> 100 m). Results also show that including topography in the calculation changes the travel distance and the spatial distribution of particles significantly. When examined in detail, in particular locations the high resolution DEM can be used to identify shelter areas where ballistic hazard is reduced, for example, behind large boulders or buildings - risk reduction strategy that proved successful for hikers caught in the 2014 eruption. In our presentation, we discuss such topographic dependency of the Ballista quantitatively.

Finally, we have made the model public by a creating graphical user interface and a user guide in order to contribute to the disaster risk management.

キーワード：火山岩塊、爆発的噴火、地形、解像度、数値モデル、グラフィカルユーザーインターフェース

Keywords: Ballistic projectiles, Explosive eruption, Topography, Resolution, Numerical Model, Graphical User Interface

# 阿蘇火山2016年10月8日噴火の降下火山礫で生じた被害の特徴

## Characteristics of damage caused by lapilli fall of the October 8, 2016 eruption of Aso Volcano, Japan

\*佐々木 寿<sup>1</sup>、成毛 志乃<sup>1</sup>、千葉 達朗<sup>1</sup>

\*Hisashi Sasaki<sup>1</sup>, Shino Naruke<sup>1</sup>, Tatsuro Chiba<sup>1</sup>

1. アジア航測株式会社

1. Asia Air Survey Co., Ltd.

御嶽山2014年噴火で火口近傍の登山客が多数負傷したことを受け、活火山における退避壕等の充実に向けた手引き（内閣府（防災担当），2015）が作成された。一般的に大きな噴石は居住地まで到達しないことが多いため、居住地に退避壕が設置された火山は少ない。一方、上空の風に流された火山礫が遠方まで到達することがあり、気象庁は小さな噴石と呼んでいる。例えば、新燃岳2011年噴火では、火口から北東約16 km地点まで、直径1.5~5 cmの小さな噴石（火山礫）が到達し、車の窓が割れるなどの被害が生じた（気象庁，2011）。気象庁が発表する降灰予報では、降灰の範囲に加え、小さな噴石の落下範囲も発表される（Hasegawa et al., 2015）。富士山広域避難計画（案）（富士山火山防災対策協議会，2014）では、宝永規模の噴火が発生すると、神奈川県まで小さな噴石（火山礫）が到達することが示されている。風に流された火山礫が建物等へ与える影響について検討された事例は少なく、特に物性との関係性は不明な点が多い。阿蘇火山2016年10月8日噴火では、降下火山礫が中岳火口の北東側に分布した。降下火山礫は数km以上離れた居住地域まで到達し、建物や農業施設等への被害が生じた。我々は噴火の翌日の2016年10月9日に現地調査を行った。本研究では2地点の被害状況について報告する。阿蘇青少年交流の家（中岳火口から北東へ約4.5 km）では、本館棟1階の網戸と窓ガラスが1枚破損しており、窓枠には3 cm程度の火山礫が数個落ちていた。網戸に形成された穴と窓ガラスの衝突中心から火山礫は北から落下してきたと推定され、中岳火口の方向とは一致しない。阿蘇青少年交流の家の渡り廊下（通路シェルター）では、屋根が複数の地点で破損していた。渡り廊下の屋根は、厚さ3 mmのポリカーボネイト板である。渡り廊下の被害は偏りが多く、破損が多かった地点は、ポリカーボネイト板が紫外線劣化している箇所であり、1 m四方に5点程度の穴（直径10 cm程度）が空いていた。破損にはポリカーボネイト板の紫外線劣化の程度が関係していると考えられる。中岳火口から北東へ約7 kmの地点では太陽光パネルの被害を確認した。道路から屋根に設置された太陽パネルが観察でき、火山礫の落下により破損していた。観察できる範囲で破損状況を集計したところ、384枚中56枚の太陽光パネルが破損していた。金子(2017)によると、この地点周辺の太陽光パネルの被害枚数は1636枚で、被害額は1億円に達すると報告されている。降下火山礫は火口から離れた地点でも被害を及ぼす可能性があるため、今後は降下火山礫の衝突エネルギーとガラスやポリカーボネイト板等の強度との関係についての解析を進めていきたい。

キーワード：降下火山礫、建物被害、阿蘇火山

Keywords: lapilli fall, damage to buildings, Aso volcano

# 噴石衝突に対する木造建築物屋根の安全性

## Safety of wooden buildings roof subjected to ballistic block collision

\*立山 耕平<sup>1</sup>、成田 啓司郎<sup>2</sup>、山田 浩之<sup>3</sup>、奥矢 恵<sup>4</sup>、充宏 吉本<sup>4</sup>

\*KOHEI TATEYAMA<sup>1</sup>, KEISHIRO NARITA<sup>2</sup>, HIROYUKI YAMADA<sup>3</sup>, MEGUMI OKUYA<sup>4</sup>, MITSUHIRO YOSHIMOTO<sup>4</sup>

1. 防衛大学校 理工学研究科学生、2. 防衛大学校 学部生、3. 防衛大学校 機械工学科、4. 山梨県富士山科学研究所

1. Graduate School of Science and Engineering, National Defense Academy, 2. Undergraduate Student of School of Systems Engineering, National Defense Academy, 3. School of Systems Engineering, National Defense Academy, 4. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government

### 1. 緒言

火山災害には、噴煙・溶岩流・火砕流・岩屑なだれ・土石流など、多様な要因が挙げられる。中でも、2014年9月27日に発生した御嶽山噴火において、その被害の多くは噴石衝突による損傷が主な原因であった。噴石被害が拡大した要因として、御嶽山にはシェルター等の避難施設が設置されていなかったことが挙げられることから、現在、活火山における退避壕等の充実が急がれている。一方で、山頂付近であっても、山小屋に非難した登山客は噴石被害から逃れることができた。この事実は、山小屋等の既存建築物の利用が、噴石衝突から身を守る上で非常に有効であることを示したと言える。

山小屋をはじめとした木造建築物は、その施設の強度に応じて一定の規模の噴石の衝突に対する安全性を有すると考えられるが、あらゆる噴石被害に対して安全性を確保するものではない。そのため、噴石衝突に対する木造建築物の安全性を正しく評価することが必要である。これまで著者らは、高機能繊維を用いて既存の木造建築物の補強に関する研究を行ってきたが、補強されていない既存の木造建築物が噴石に対してどれほどの耐久性を有しているかはわかっていない。

そこで本研究では、一般的に用いられている杉板を用いた木造建築物屋根に対して噴石衝突模擬実験を行うことにより、噴石衝突に対する安全性を明らかにする。

### 2. 実験方法

#### 2.1 飛翔体

飛翔体には、噴石の標準的な密度（約2400kg/m<sup>3</sup>）に近い値を持つ直径90mmのビトリファイド砥石（2421kg/m<sup>3</sup>）を用いた。火山噴火において飛散するものは、小さいもので直径2~64mmの大きさの火山れき、このサイズ以上の噴石が存在する。中でも、噴火時に最も多く飛散する噴石はこぶし大サイズ（φ100mm程度）である。そこで、本研究では、直径128mmの噴石を想定し、飛翔体質量を2.66kgとした。

#### 2.2 木造建築物の屋根模擬試験体

木造建築物屋根を模擬するため、屋根板として板厚18mmの杉板、その表面に防水シートと厚さ0.4mmのガルバリウム鋼板を取り付けたものに、垂木を組み合わせた試験体を作製した。このとき、試験体は5枚の杉板により構成されており、外側の2枚が75mm×600mm、中心3枚は150mm×600mmである。試験体全体の寸法は600mm×600mmである。垂木の寸法は高さ90mm、厚さ45mm、長さ600mmであり、垂木間隔は、垂木の中心を基準として455mmである。構成部材は釘により固定しており、釘間隔はおおむね150mmである。この試験体を実験装置に固定する際には、外径750mm×750mm、内径450mm×450mmの鉄枠により挟み込み、ボルトにより固定した。

#### 2.3 高速投射型衝突破壊実験装置

高速投射型衝突破壊実験装置は発射部およびターゲット台で構成されている。圧縮空気により飛翔体を加速し、ターゲットに衝突させる構造になっている。衝突速度は、発射管の先端2カ所に50mmの間隔で設置したレーザーおよび受光部を用いて測定を行う。飛翔体がレーザーを通過し、受光部への照射を遮ると受光部から

出力される電圧が低下し、飛翔体が通過し終わると、再度受光部にレーザーが照射され、電圧が増加する。この電圧低下点および電圧上昇点の時間差を利用して衝突速度を測定した。

### 3. 屋根模擬試験体に対する衝突実験

#### 3.1 実験条件

本実験では、飛翔体の質量を2.66kgに固定したため、速度を変化させることで、運動エネルギーを変化させた。このとき、飛翔体の持つ運動エネルギーを衝突エネルギーとし、このエネルギー量に着目して、実験を行った。飛翔体速度は10m/s～100m/sの範囲で行った。

#### 3.2 実験結果

運動エネルギーを変化させた実験より、衝突エネルギー1200J付近が貫通と不貫通の境界となることがわかった。また、比較的衝突エネルギーの小さい場合では、貫通・不貫通にかかわらず、衝突箇所から放射状にしわが観察され、ガルバリウム鋼板全体に変形が生じていた。この時、杉板は衝突した中央の板のみが変形しており、その他の板および垂木に変形は見られなかった。変形した杉板は垂木に沿って破断しており、垂木を支点とした曲げ変形の影響が大きいことがわかった。

一方、衝突エネルギーの大きい場合においては、ガルバリウム鋼板に変形した様子は観察されず、飛翔体との接触面付近のみの局所的なせん断破壊が観察された。杉板は衝突部から破壊が広がっていることがわかった。これらの結果から、杉板とガルバリウム鋼板において、衝突エネルギーによって変形の様相が変化することがわかった。

#### 3.3 屋根模擬試験体の貫通限界

実験結果より、屋根模擬試験体の貫通境界は1200～1500 J 付近と求めることができた。内閣府が定めている「活火山における退避壕等の充実にに向けた手引き 参考資料」の中にある様々な噴石のサイズと衝突エネルギーの目安を参考にすると、得られた値は、火山れきの上限である直径64mmの火山れきが100m/sで衝突する際の衝突エネルギーである1700 J に近いことがわかる。本実験での飛翔体との大きさは異なるため、あくまでもエネルギー量から考えた目安となるが、18mmの杉板を使用した木造建築物屋根では、大半の火山れきの貫通を防ぐことが可能であると考えられる。

## 4. 結言

本研究では、高速投射型衝突破壊実験装置を用いて木造建築物屋根を模擬した試験体に対する衝突実験を行った。このとき、2.66kgの飛翔体、板厚18mm、垂木幅455mmの杉板の屋根を想定して実験を行い、以下のことがわかった。

- (1) 18mmの試験体の貫通の境界エネルギーは1200J付近である。
- (2) 衝突エネルギーが小さい場合、垂木を支点とした曲げ変形が支配的であるが、衝突エネルギーが大きい場合は衝突部から変形が広がる様相が観察された。
- (3) 板厚18mmの試験体は、100m/sで飛んでくる火山れきの大半の貫通を防ぐことができる。

キーワード：噴石、木造建築物屋根、衝突

Keywords: Ballistic block, Wooden buildings roof, Collision