

突発的水蒸気噴火の危険とその防護対策例

山田 浩之, 立山 耕平

2014年9月27日に発生した御嶽山における突発的な水蒸気噴火の被害を受けて、耐噴石衝突シェルターの検討が始まった。中でも、高所での作業が困難な場所でも対応できるように、既存施設である山小屋の補強が目ざされている。アラミド繊維織物を使用した補強方法では、直径100mm程度の噴石が83m/s(300km/h)で衝突しても耐えられることが実験的に明らかになり、多くの山小屋で補強が始まっている。本稿では、衝突試験によるアラミド繊維織物の補強効果とともに、木材による補強、量の耐噴石衝突特性について紹介し、耐噴石避難施設の充実化についてまとめる。

キーワード：噴石、シェルター、衝撃

1. はじめに

2014年9月27日、岐阜県と長野県の県境に位置する御嶽山において水蒸気噴火が発生した。この噴火は予測ができずに突発的に生じたことから、山頂付近にいた登山客に多くの犠牲者が出た。その主な死因は、飛来した火山礫および火山岩塊（以下、噴石とまとめる）による損傷死であった[1-3]。また、2018年1月23日、群馬県の本白根山で発生した水蒸気噴火においても、噴石が訓練中の自衛隊員の背中へ直撃し、1名が犠牲となった[4]。また、海外に目を向けると、2019年12月9日、ニュージーランド北島北東部のプレンティ湾に位置するホワイット島の突発的噴火では、観光客が被害を受けて、22名の犠牲者（2020年1月30日時点）が出ている[5]。このように、近年、予測ができずに噴火する火山災害による人的被害が目立っている。特に、日本国内で生じた噴火による人的被害は、改めて火山災害、特に水蒸気噴火の対応が難しいことを認識させられた。火山を重要な観光資源とする国において、突発的に生じる噴火への対策は重要な課題である。よって、噴石衝突被害を低減する技術の確立は喫緊の課題となる。

火山防災対策においては避難などの対応を示すことが基礎となる[6]。そこで、これまでの調査および研究成果から避難範囲や避難経路を検討するための取り組み

みとして、各自治体における火山防災マップ[7]の作成が行われている。一方、水蒸気噴火時の突発的な噴石飛散の影響を受ける火口近傍においては、避難施設などの設置が重要となる。そこで、2014年御嶽山噴火以降に、噴石衝突被害を低減することを目的とした研究が本格的に始まった[8-11]。この噴火では、図1に示すように多くの山小屋に噴石が衝突して甚大な物的被害が生じたが、これらの山小屋などの木造建築物に避難した登山客は全員生還した[9]。これは特筆すべき事実であり、退避施設や退避壕など（以下、耐噴石衝突シェルターとまとめる）が突発的噴火において重要な役割を示すことを示唆した。しかし、国内外において、耐噴石衝突シェルターの明確な設計指針は存在していない。そこで、御嶽山における噴石の飛散状況の理解が第一歩となる。火山噴火予知連絡会および内閣府防災担当の合同のフィールドワーク調査の結果、2014年御嶽山の噴火で飛散した噴石の多くは直径100mm前後であることがわかっている[9]。残念ながら、これまで噴石の飛散分布とそのサイズの関係性をまとめた報告はほとんど見られず、噴石衝突による大きな被害が生じた2014年御嶽山噴火によってこの関係の調査の必要性が理解された。

ここで重要な課題として、これまでの火山防災では、研究報告や報道などで目立った非常に大きな噴石を基準に耐噴石衝突シェルターの整備を考えてきたことが挙げられる。この考え方では、確認された1個の最大直径の噴石を基に耐噴石衝突シェルターを設計することになるため、幅広い面積に飛散する噴石の衝突確率を鑑みれば、確率論的にほとんど起こりえない状況に対して過剰に備えていることになる。そこで、著者らのグループでは、フィールドワーク調査で多数飛散したと報告されている直径100mm程度の噴石を基準と

やまだ ひろゆき
防衛大学校機械工学科
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20
ymda@nda.ac.jp
たてやま こうへい
立命館大学理工学部機械工学科
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
koheit@fc.ritsumeai.ac.jp



図1 2015年8月19日および20日に調査した2014年御嶽山噴火で生じた山小屋などの被害の様子 (a: 御嶽頂上山荘の屋根被害, b: 御嶽神社奥社祈禱所の壁被害, c: 王滝頂上山荘の壁被害, d: 御嶽頂上山荘から御嶽神社奥社に繋がる階段の噴石飛散状況, e: 御嶽剣ヶ峰山荘の内部被害) [9]

表1 模擬噴石飛翔体に使用したビトリファイド砥石の諸元 [9]

規格	WA46 O8 VSK-1
砥粒	白色アルミナ
密度	2,421 kg/m ³
粒径	300~355 μm
気孔率	46%
結合剤	ビトリファイドボンド
結合度	O
圧縮破壊応力 ひずみ速度 $7.5 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$	153 MPa

して、実験的検討を行っている。

本稿では、これまで著者らが行ってきた御嶽山2014年被害を想定した模擬噴石衝突試験の結果の中で、学術論文として報告されている水蒸気噴火の被害低減に向けた山小屋のシェルター化について紹介する。

2. 実験方法

耐噴石衝突シェルターを考えるうえで、内閣府防災担当の依頼により、2015年から著者らのグループ [9-11] が日本で初めて本格的に実験を開始した。以下に、その実験方法をまとめる。

2.1 飛翔体

Williams et al. [8] は、著者らのグループと同時期に噴石衝突試験を開始している。このグループでは、実際の噴石を飛翔体として空気圧式で発射している。しかし、実際の噴石を利用した実験は形状の影響、衝突エネルギーや衝突速度の制御が困難であり、現実的ではないと判断した。そこで、飛翔体には、噴石の標準的な密度 (約 2,400 kg/m³) に近い値をもつビトリファイド砥石 (2,421 kg/m³) を模擬噴石として用いた。使用したビトリファイド砥石の諸元を表1に示す。ビトリファイド砥石は、研削加工に使用されているため規格が存在しており、入手が簡単で多量の実験に適している。

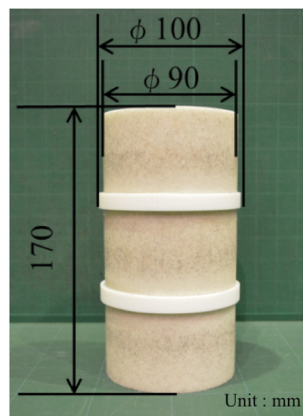


図2 模擬噴石飛翔体の外観 [9]

本来の噴石は角があり、衝突面が一定にはならない。この点を考慮して実験を行うと数限りない実験を行うことになってしまう。そこで、本研究では、飛翔体の作製が容易な点も含めて、すべての実験に対し、同一形状の飛翔体を使用することとした。そこで、直径128 mmの噴石を想定し、直径90 mmの砥石を組み合わせることで、図2に示す約2.66 kgの模擬噴石飛翔体を作製した。図中のテフロンリングは、後述の高速投射型衝突破壊実験装置におけるホーニングパイプを通過する際のガイドの役目を果たす。この模擬噴石飛翔体のもつ運動エネルギーを衝突エネルギーと定義する。

2.2 高速投射型衝突破壊実験装置

図3(a)に高速投射型衝突破壊実験装置の概略を示す。装置は発射部およびターゲット固定部 (図3(b)) で構成されている。発射部は、φ100 mm、長さ3,000 mmのステンレス製ホーニング管を2本連結し、飛翔体加速距離を全長6,000 mmとしている。圧力タンクとの接続部にPETフィルム隔膜を設置することにより圧力タンクを密閉している。圧力タンクが加圧された状態で隔膜脇に設置された針を差し込むと、隔膜が破裂し、加圧された空気は瞬時に発射管に放出される。発

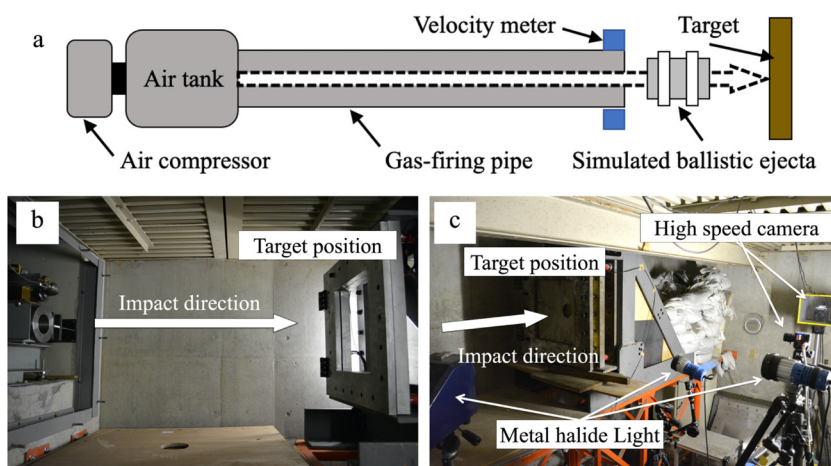


図3 高速投射型衝突破壊実験装置 (a: 装置模式図, b: 試験体の衝突方向, c: ハイスピードカメラ撮影の配置図の一例) [9, 10]

射管内に設置された砥石は放出された空気により加速される。衝突速度は、発射管の先端 2 カ所に 50 mm 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できる。図 3(b) に示すとおり、発射後飛翔体に衝突するまでの間に距離があるが、その間に速度はほとんど減衰しないことをハイスピードカメラ観察 (設置状況: 図 3(c)) によって確認している。

衝突ターゲットとなる試験体の固定部は分離式で、厚さにかかわらず挟み込むことが可能である。高強度な試験対象にも対応できるように最大許容量は約 3,000 kN で設計している。試験体は、外径 750 × 750 mm、内径 450 × 450 mm の鉄枠により挟み込み、ボルトにより手締め固定した。また、ターゲット固定部は地下構造であり、コンクリート壁で囲まれている。衝突により破壊し、飛散する砥石から試験装置および設備を防護するため、発射口周囲を鉄板で覆い、ターゲット後方には土嚢壁を設置している。

3. 山小屋の補強

2014 年御嶽山噴火では、被害が多数出た山頂付近において、山小屋に避難した登山客は噴石被害から逃れることができたことから、山小屋の利用が噴石衝突から身を守るうえで非常に有効であることが示された。物資の輸送が困難である多くの山々の高所では、金属製および鉄筋コンクリート製シェルターなどを作ること

は難しいため、既存の山小屋の補強が推奨される。その中で、噴石が衝突する確率の高い屋根の補強と、山小屋の多くが和風であることに注目した屋内補強の方法案を以下に示す。

3.1 アラミド繊維織物による補強 [9]

基本的な山小屋の屋根の構造は、上から、ガルバリウム鋼板、防水シート、木材の順になっている。そこで、木材と防水シートの間にアラミド繊維織物を挟み込み、噴石衝突に耐える構造を考えた。この構造の模式図を図 4 に示す。使用したアラミド繊維織物 (#FS3300, 東レ製) は、パラ系芳香族ポリアミドを使用しており、平織で、厚さ 0.6 ± 0.1 mm、縦および横方向の引張強度 9 kN/30 mm 以上を有している。このアラミド繊維織物を 2 枚重ねて挟み込んだ。なお、使用した木材は、板厚 15 mm の静岡県浜松市天竜産の無垢材で板目材である。

図 5 に衝突試験後の試験体の様子を示す。補強前の木材が主の構造では衝突部の局所的な領域で破壊が生じている。一方、アラミド繊維織物を挟み込んで補強すると、飛翔体は貫通しなかった。アラミド繊維織物を挟み込むことで、衝突面のガルバリウム鋼板の変形が全体に広がっており、合わせて、裏面の木材 (厚さ 15 mm の杉板) も全体的に破壊が生じている。このように変形が全体に広がったため、引張変形に強いアラミド繊維織物の特性が現れた結果となった。この結果より、アラミド繊維織物による補強は、安全を見込み直径 100 mm 程度の噴石が 83 m/s (300 km/h) で衝突しても耐えられる構造であることを実験的に示すことができた。

御嶽山で採用された例を図 6 に示す。期待どおり施

工方法は簡便であり、短期間での補強が可能である。山小屋のシェルター化は、避難施設として完全な安全を保証するものではない。しかし、高所で重機工事が困難な場所においては、噴石衝突に対する防護力を上げる数少ない手段として普及されることが望まれる。

3.2 木材による補強 [10]

アラミド繊維織物は高価なため、本格的な補強工事

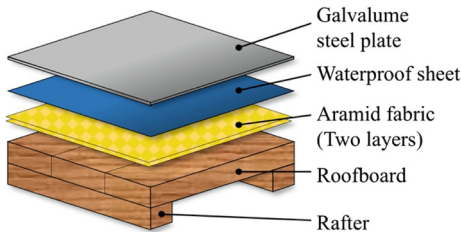


図4 木造屋根のアラミド繊維織物補強の模式図 [9]

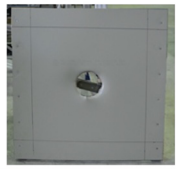
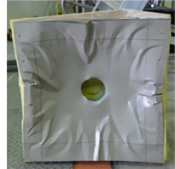


Condition	Without aramid fabric	With aramid fabric
Result	Penetrated: ×	Damaged but not penetrated: ○
Velocity	83.2 m/s	81.2 m/s
Impact energy	9207 J	8769 J
Impact surface		
Back side		

図5 アラミド繊維織物による補強効果を示す衝突試験後の試験体の様子 [9]

の前に一時的に簡易補強する方法も重要と考える。そこで、木材のみで補強する方法を提案する。屋根構造の強化策として、一般的な建築構造の考えにこだわらずに板材の張り方を変更し、杉板を2層重ね合わせることにした。しかし、板材を単純に2層重ね合わせるだけでは、補強効果は限定的と考えられるため、図7に示すスタッガード構造とクロス構造の2種類を検討する。

衝突試験に使用した木材は先述と同様であるが、板厚は15mmと18mmの2種類とした。試験体全体の寸法は600×600mmであり、75×600mmの杉板と、150×600mmの杉板を重ね合わせている。このとき、試験体は1層につき5枚または4枚の杉板により構成されている。図7の破線部で示すように、スタッガード構造は2層目に衝突部が2枚重なるように、クロス構造は2層目の1枚の中心に衝突するように作製した。すべての試験体で、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とした。クロス構造では、試験体の作製の都合上、垂木間にも補助で添え木を追加した。

図8に衝突試験後のスタッガード構造およびクロス構造の貫通境界における表面と裏面の破壊の様子を示す。スタッガード構造では、15mmおよび18mmともに表面のガルバニウム鋼板にしわが発生しており、裏面の破壊の様相も変わらない。2層とも杉板が横方向のため、ほとんどの衝突エネルギーが2層目の2枚の接触部近傍と1層目の1枚に作用しており、飛翔体の衝突面積分の板にしか荷重が作用しておらず、重ね合わせの効果が小さいことがわかる。言い換えれば、ただ2枚重ねただけの結果に近い。1層目と2層目が同じ方向で、施工時に半分位置をずらすだけの簡便な補強方法(スタッガード構造)は、衝撃吸収構造としては、推奨できないことがわかった。



図6 御嶽山におけるアラミド繊維織物を用いた補強の様子 (a: 王滝村9合目避難小屋, b: 石室山荘) [9]

一方、クロス構造の場合も、表面のガルバリウム鋼板にはスタッガード構造と同様にしわが発生しているが、しわの変形量には差が生じている。表面から観察すると、2層目は衝突した1枚のみの貫通に見えるが、裏面を見ると、破壊が全体に分散している。2層目の杉板の組み合わせ方向が1層目と90°回転させた効果が表れているといえる。スタッガード構造と同様に、2層目の変形が1層目を押すことで変形および破壊を誘起する効果が裏面全体に影響し、貫通境界エネルギーの

増加に寄与している。

しかし、スタッガード構造とクロス構造を検討した結果、2枚重ねた場合よりも多少のエネルギー吸収量を上げる程度の結果となり、構造を付与した効果によるエネルギー吸収量は期待よりも高くないことがわかった。よって、現状では、山小屋屋根の補強はアラミド繊維織物を挟み込む方法が最適といえる。現在、その他の補強方法を実験的に検討しており、将来的には、安価な簡易補強方法を提案したい。

3.3 畳による屋内補強 [11]

山小屋のシェルター化において、屋根の補強以外を考える。すなわち、日本の木造建築物の基本的構成から、木造建築物の潜在的な耐噴石衝突特性を理解することが必要といえる。

日本の山小屋は和風であることが多く、畳を用いた和室がある。たとえば、御嶽山における山小屋の和室の例として、9合目にある石室山荘(図9(a))と山頂付近の二ノ池山荘(図9(b))の様子を示す。また、2014年御嶽山の噴火被害を受けた王滝頂上山荘では、調査の結果、厚さ50~60mm程度の畳(稲わらサンドイッチ畳床)が使用されていた。畳は一般的な山小屋屋根の野地板の厚さ(15mm程度)と比較して3倍以上厚いことから、噴石に対する衝撃吸収材料として、床材に用いられる畳の利用が期待できる。しかし、これまでの畳の衝撃変形や衝撃緩衝特性に関する研究は、人が転倒した場合を想定した検討[12, 13]や、畳に衝突した人体の損傷評価[14]などが報告されているのみで、畳の本来の使用用途から大きく異なる数十m/sを超えるような高速度での衝突試験は行われていない。そこ

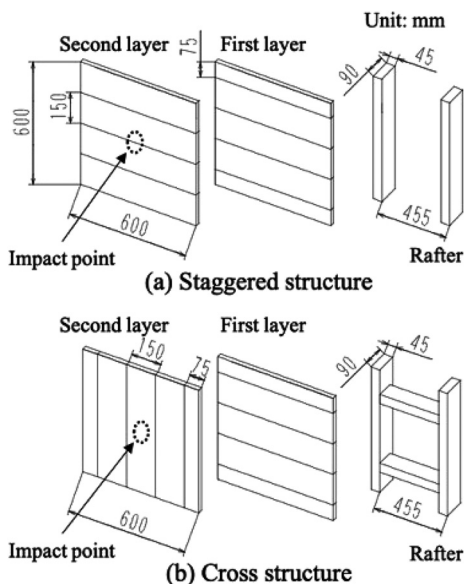


図7 スタッガード構造(1層目と2層目が同じ方向で、施工時に半分位置をずらす構造)およびクロス構造試験体の模式図 [10]

Condition	15mm Staggered	18mm Staggered	15mm Cross	18mm Cross
Velocity	38.1 m/s	37.8 m/s	41.2 m/s	42.1 m/s
Impact energy	1930 J	1900 J	2258 J	2362J
Impact surface				
Back side				

図8 衝突試験後のスタッガード構造およびクロス構造の貫通境界における表面と裏面の破壊の様子 [10]

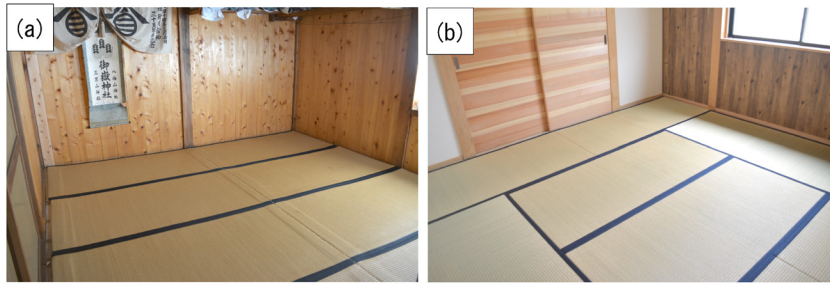


図9 御嶽山における山小屋の和室 (a: 石室山荘, b: ニノ池山荘) [11]

補強されていない山小屋屋根
(Unreinforced mountain hut roof)
材質 : 杉板
(Material) (Cedar board)
厚み : 15 mm
(Thickness)

アラミド繊維で補強された山小屋屋根
(Hut roof reinforced with aramid fabric)
アラミド繊維 : FS3300
(Aramid fabric)
補強層数 : 2層
(Number of layer) (Two layer)
固定方法 : ボルトで強固に固定
(Fixing method) (Firmly fixed with bolts)

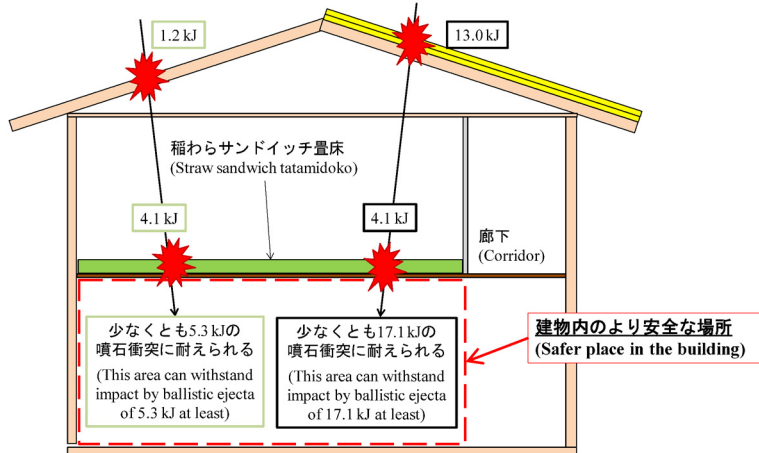


図10 畳を利用した「建物内のより安全な場所」 [11]

で、一般的に普及しているさまざまな種類の畳に対する模擬噴石衝突試験を行い、畳の耐噴石衝突特性に関する実験的検討を行った。

日本において古来より使用されてきた伝統的な畳床である稲わら畳床、木造家屋やマンションなどで一般的に使用されている畳床である III 型建材畳床、および稲わら畳床と III 型建材畳床の中間の性質をもっている稲わらサンドイッチ畳床の 3 種類を実験対象とし、市販の新品を試験体として用いた。模擬噴石衝突試験の結果、稲わら畳床および稲わらサンドイッチ畳床では、各貫通境界エネルギーはそれぞれ、4.9 kJ および 4.1 kJ であることがわかった。これらの値は、一般的な山小屋屋根よりも優れている。一方、III 型建材畳床は、高速投射型衝突破壊実験装置の最小速度の関係で不貫通の結果を得ることができなかったが、少なくとも 0.63 kJ の衝突エネルギーに対して飛翔体の貫通を

防ぐことができないことがわかった。

上記の山小屋の耐噴石衝突特性から、火山周辺の木造建築物において畳の階下が「建物内のより安全な場所」としてどのように利用可能であるかについても検討する。模擬噴石衝突試験で得られた結果から、畳を利用した「建物内のより安全な場所」について図 10 にそのイメージを示す。ここで、アラミド繊維織物 (FS3300) 二枚によって補強された山小屋屋根の貫通境界エネルギーは、精確に定義されていないが少なくとも 13.0 kJ 以上である [9]。ここで、アラミド繊維織物で補強された山小屋屋根の貫通境界エネルギーを仮に 13.0 kJ と定義して山小屋屋根と畳床 (たとえば稲わらサンドイッチ畳床) の貫通境界エネルギーを単純に合計すると、補強なしでも 5.3 kJ 以上、補強をすることで 17.1 kJ 以上の噴石衝突に耐えられることになる。たとえば火山礫の上限である直径 64 mm の火山礫が 100 m/s (360 km/h)

で衝突する際の衝突エネルギーは1.7kJである。よって、補強の有無にかかわらず、稲わら畳床および稲わらサンドイッチ畳床の階下では、すべての火山礫の貫通を防ぐことが可能である。また、たとえば速度を83m/s(300km/h)で固定して考えた場合、補強されていない山小屋における稲わらサンドイッチ畳床の階下では最大で直径107mm、補強された山小屋においては最大で直径158mmの噴石が衝突した場合でも、噴石の貫通を防ぐことが理論上可能である。これより、稲わら畳床および稲わらサンドイッチ畳床の階下は「建物内のより安全な場所」として十分利用可能であることが示された。

4. まとめ

これまで模擬噴石衝突試験によって評価してきた耐噴石避難施設の中で、山小屋のシェルター化についてまとめた。中でも、アラミド繊維織物を使用した山小屋のシェルター化は、内閣府防災担当が発行している「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き」[15, 16]に記載されており、手引き発行後に多くの山小屋で採用されている[17]。また、畳を利用した「建物内のより安全な場所」の考え方は、今後の耐噴石衝突シェルターの普及において重要となる。予測できない突発的な噴火に対して完璧な安全を確立することは無理であるが、現状よりも安全性を高めることは可能である。注意事項として、避難施設を充実化するために必要なことは、設置場所に合わせて適当な種類、材料を選択することである。火山と共生する日本において、耐噴石避難施設の充実化が期待される。

謝辞 本研究の成果は、多くの火山学者、自治体関係者、火山に携わる方々のご協力によって得られました。特に、山梨県富士山科学研究所およびアジア航測株式会社の皆様には衝突実験で多大なご協力をいただきました。また、王滝村役場 稗田実氏、木曾町役場 和出彰氏には御嶽山に関わる貴重な情報を提供していただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

[1] 及川輝樹, 山岡耕春, 吉本充宏, 中田節也, 竹下欣宏, 前野深, 石塚吉浩, 小森次郎, 嶋野岳人, 中野俊, “御嶽山2014年噴火,” *火山*, **60**, pp. 411–415, 2015.
 [2] T. Kaneko, F. Maeno and S. Nakada, “2014 Mount Ontake eruption: Characteristics of the phreatic eruption as inferred from aerial observations,” *Earth, Plan-*

ets and Space, **68**, 72, 2016.
 [3] T. Oikawa, M. Yoshimoto, S. Nakada, F. Maeno, J. Komori, T. Shimano, Y. Takeshita, Y. Ishizuka and Y. Ishimine, “Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews,” *Earth, Planets and Space*, **68**, 79, 2016.
 [4] 総務省消防庁, 「本白根山の火山活動による被害及び消防機関等の対応状況等(第9報・H30.2.23更新)」, <http://www.fdma.go.jp/bn/2018/> (2021年5月4日閲覧)
 [5] The New Zealand Herald, White Island eruption: Double tragedy for American family after husband dies, <https://www.nzherald.co.nz/nz/white-island-eruption-double-tragedy-for-american-family-after-husband-dies/7PCXA6IIOJWNXLRMJZDBBUXUD4/> (2021年5月4日閲覧)
 [6] 田島靖久, “火山ハザードマップと噴火シナリオが火山防災対策に果たす役割,” *火山*, **62**, pp. 61–82, 2017.
 [7] 国立研究開発法人防災科学技術研究所, 「V-hazard-火山ハザードマップデータベース」, <http://vivaweb2.bosai.go.jp/v-hazard/> (2021年5月4日閲覧)
 [8] G. T. Williams, B. M. Kennedy, T. M. Wilson, R. H. Fitzgerald, K. Tsunematsu and A. Teissier, “Buildings vs. ballistics: Quantifying the vulnerability of buildings to volcanic ballistic impacts using field studies and pneumatic cannon experiments,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **343**, pp. 171–180, 2017.
 [9] H. Yamada, K. Tateyama, H. Sasaki, S. Naruke, H. Kishimoto and M. Yoshimoto, “Impact resistance to ballistic ejecta of wooden buildings and a simple reinforcement method using aramid fabric,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **359**, pp. 37–46, 2018.
 [10] 山田浩之, 立山耕平, 本多亮, 吉本充宏, 藤井敏嗣, “噴石衝突に対する木造建築物屋根の簡易構造補強,” *火山*, **64**, pp. 243–251, 2019.
 [11] 立山耕平, 成毛志乃, 佐々木寿, 福井拓哉, 山田浩之, “山小屋の安全性向上に資する畳の耐噴石衝突特性評価,” *火山*, **65**, pp. 41–51, 2020.
 [12] 富田隆太, 井上勝夫, 川又周太, “住宅内の転倒時を想定した直張り木質フローリング床の頭部衝撃緩衝効果に関する検討,” *日本建築学会技術報告集*, **13**, pp. 591–596, 2007.
 [13] T. Shimizu and K. Yoshitani, “Impact-reduction effect of tatami floor mat made of nonwoven fabric for head injuries in fall accidents,” *Journal of Building Engineering*, **24**, 100728, 2019.
 [14] 相場一希, 大宮正毅, 射手矢呷, 紙谷武, 戸松泰介, “柔道における後頭衝突時の急性硬膜下血腫発生評価指標の比較と頭部保護具の効果,” *日本機械学会論文集(A編)*, **78**, pp. 1631–1641, 2012.
 [15] 内閣府防災担当, 「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き」, http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryo/pdf/201512_hinan_tebiki3.pdf (2021年5月4日閲覧)
 [16] 内閣府防災担当, 「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き(参考資料)」, http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryo/pdf/201512_hinan_tebiki4.pdf (2021年5月4日閲覧)
 [17] 成毛志乃, 佐々木寿, 山田浩之, “「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き」公表後の退避壕等の整備状況,” *日本火山学会2017年度秋季大会講演予稿集*, p. 196, 2017.