模擬火山れきに対する登山用ヘルメットの耐衝撃特性†

山田 浩之* 鵜飼 悠帆** 樋口 理宏*** 立山 耕平****
佐々木 寿***** 保科 祐一郎***** 和田野 加恵***** 小笠原 永久*

Impact Resistance of Mountaineering Helmets to Simulated Lapilli

by

Hiroyuki YAMADA*, Yuho UKAI**, Masahiro HIGUCHI***, Kohei TATEYAMA****
Hisashi SASAKI*****, Yuichiro HOSHINA*****, Kae WADANO***** and Nagahisa OGASAWARA*

In recent years, casualties due to the impacts of falling lapilli and ballistic ejecta resulting from volcanic eruptions with unclear precursors have increased. However, while research and development efforts aimed at protecting people from such scattered ejecta via improved volcanic shelters are progressing, there has been little research on volcanic disaster prevention measures aimed at directly protecting the human body. Accordingly, this study reports on the development of an impact test apparatus and a human head model that can be used to evaluate the impacts of volcanic lapilli as well as the results of our impact resistance evaluation of a commercially available mountaineering helmet (ravina FLUQUE made by Tanizawa Seisakusho, Ltd.). In our experiments, vitrified grindstone with a standard density of approximately 2400 kg/m³ were used as simulated lapilli and launched at the helmet at velocities of approximately 40-80 m/s. Impact safety was evaluated from the damage sustained by the helmet and the head injury criterion (HIC) value, which was calculated via a triaxial accelerometer installed on the head model. Experimental results show that the damage to mountaineering helmet used in this study was small and that the HIC value was low even when it was impacted by lapilli equivalents with diameters up to 30 mm travelling at velocities of up to approximately 60 m/s, thereby suggesting that the mountaineering helmet provided sufficient protection up to that impact velocity. Additionally, summarizing the relationship between the interior/exterior damage of the helmet and the HIC value, it was found that the HIC values can vary significantly due to deformation and fracture of the protective foam material mounted inside the helmet.

Key words:

Impact, Lapilli, Mountaineering helmet, Volcanic eruption, Head injury criterion, Impact-resistant design

1 緒 言

日本は、世界有数の火山大国の一つである。火山噴火予知連絡会が定義している「概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山」の数は2021年現在で111存在している。日本人は、古くからこれらの多くの火山と共存しているが、時に大きな災害を受けることになる。火山災害の要因となる主な火山現象は、火山れきおよび火山岩塊（一般的に噴石と称される）、火砕流、融雪型火山泥流、溶岩流、火山灰、火山ガス等が挙げられる。^{1),2)} これら火山災害による死傷の原因として、火砕流や火山泥流が最も高い割合を占める。しかし、近年では、

前兆が不明瞭な噴火により飛散する火山れき（直径2~64 mm）や火山岩塊（直径64 mm以上）の衝突による人的被害の割合が増加している。例えば、岐阜県と長野県境に位置する御嶽山において、2014年9月27日に突然発生した水蒸気噴火では、山頂付近にいた登山客の多くに飛来した噴石が衝突し、死者だけで58名（2021年4月現在）に達する被害が生じた。^{3)~5)} よって、これら飛散物から身を守る手段として、著者らの一部を含むグループが避難場所となる火山シェルターの安全性に関する実験的検討を行ってきた。^{6)~8)} この成果の一部は、内閣府防災担当が2015年12月に発行した「活火山における退避壕等の充実

† 原稿受理 令和3年4月18日 Received Apr. 18, 2021 ©2022 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 防衛大学校 機械工学科 〒239-8686 横須賀市走水

Department of Mechanical Engineering, National Defense Academy, Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686.

** 防衛大学校 機械工学科 学部生 〒239-8686 横須賀市走水

Undergraduate Student, Department of Mechanical Engineering, National Defense Academy, Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686.

*** 正 会 員 金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系 〒920-1192 金沢市角間町

Faculty of Frontier Engineering, Institute of Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192.

**** 正 会 員 立命館大学 理工学部 機械工学科 〒525-8577 草津市野路東

Department of Mechanical Engineering, School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577.

***** アジア航測(株) 〒215-0004 川崎市麻生区万福寺

Asia Air Survey Co., Ltd., Manpukuji, Asao-ku, Kawasaki, 215-004.

***** (株)谷沢製作所 〒104-0041 東京都中央区新富

Tanizawa Seisakusho, Ltd., Shintomi, Chuo-ku, Tokyo 104-0041.

に向けた手引き」⁹⁾に記載され、多くの山小屋が補強されることでシェルターの機能を有すようになった。しかし、これまでの研究は、避難施設の充実化に焦点を当てており、避難施設にたどり着くまでの人を直接守る火山防災装備については研究が遅れているのが現状である。

人体を守る火山防災装備の代表格が重要部位である頭部を保護するヘルメットである。内閣府および気象庁が提示している火山への登山の備えとして、ヘルメットの着用が噴石対策として推奨されている。¹⁰⁾ また、御嶽山では2014年の噴火以降、自治体を中心に登山客にヘルメット装備を呼びかけている。¹¹⁾ 火山活動が活発な桜島の周辺では、児童・生徒がヘルメットを被って登下校しており、火山れきに対する備えをしている。¹²⁾ しかし、これらのように、国や自治体がヘルメットの着用を訴えかけても、現実問題として、肝心なヘルメットに対する火山れき等の衝突に対する安全性は評価されていない。すなわち、火山防災においてヘルメットの着用を推奨しているが、その根拠となる理由は明示されていないのが現状である。

そこで本研究では、火山噴火時に広範囲に多数飛散する火山れきの衝突現象を評価できる試験装置を開発する。また、模擬火山れきを用いて、市販されている登山用ヘルメットの耐衝撃特性評価を行い、安全の限界を明らかにする。

2 模擬火山れき

噴石衝突試験において、実際に飛散する噴石を使用した実験は再現性の確保が困難である。そこで、これまでの火山防災シェルターに関する実験^{9)~8)}と同様に、噴石の標準的な密度約 2400 kg/m^3 とほぼ同程度の密度を持つビトリファイド砥石を模擬火山れきとして用いた。火山噴

火において広範囲に飛散する火山れきは、直径 2 mm 程度の小さなものから直径 64 mm 程度の大きなものがある。

Fig. 1 に示す直径約 30 mm 相当の火山れきは、2016年10月8日の阿蘇山中岳第一火口における噴火で実際に飛散したものである。これらは噴火口から約 4.4 km 離れた網戸付きの窓ガラスを破壊していることから、火山れきは、広範囲に飛散しかつ相当の破壊力を持つことがわかる。本物の火山れきを採取、加工して衝突試験に使用することは困難なため、本研究では、直径約 30 mm 相当の火山れき(約 35 g)を想定し、ビトリファイド砥石を用いて、同質量となる体積かつ加工が容易な円柱状(直径 20 mm × 長さ 45 mm)とした。これを発泡ポリスチレン製のサポ(発泡倍率30倍、直径 50 mm 、長さ 50 mm で穴径が直径 20 mm 、深さ 20 mm)に挿入し、後述する衝突試験装置の発射管へ装填できるようにした。速度計測のために、内部にはネオジウム磁石(直径 10 mm × 長さ 10 mm)を設置している。

3 登山用ヘルメット

登山用のヘルメットは、滑落、落石等による頭部傷害を防止するための対策として、国際山岳連盟(UIAA)によって定められた安全基準UIAA106規格¹³⁾やヨーロッパの登山用ヘルメットの安全基準であるEN12492規格¹⁴⁾が存在する。基準が厳しいUIAA106規格を見ると、例えば衝撃吸収特性については、ヘルメットに 5 kg の半球形ストライカを 2 m の高さから落下した際に衝撃荷重 8 kN 以下になるように、また、耐貫通性としてヘルメットに 3 kg の円錐形ストライカを 1 m の高さから落下した際にストライカが頭部モデルに接触しないように設計することが求

Fig. 1 Lapilli scattered by Aso volcano eruption on October 8, 2016.

Fig. 2 Top and bottom sides of the helmet used in this study.

Fig. 3 Schematic diagram of impact test equipment for simulated lapilli.

められる。本研究で使用したヘルメットは、材料および構造だけでなく、耐久性や衝撃吸収性、あご紐の強さなどの観点から、これらの規格に適合している。なお、これらの規格の値は、産業用保護帽の規格である昭和 50 年労働省告示第 66 号¹⁵⁾の飛来・落下用も包括している。しかし、前述の通り、登山用のヘルメットの耐噴石衝突安全に関する規格は存在しないため、この値が火山防災用として利用できるかは、実際の現象に近い衝突実験による検討が必要である。

そこで、本研究では 2016 年 4 月に販売された谷沢製作所製の登山用ヘルメット「ravina FLUQUE」を用いて検討を行った。欧米人に比べて頭部の縦幅が短く横幅が長い日本人の頭部を対象として作られている。ヘルメットの外観の様子を Fig. 2 に示す。外側は ABS 樹脂で、内部は軽量かつ衝撃吸収および緩衝を期待して発泡倍率 20 倍の発泡ポリスチレン (EPS) を用いている。また、底面側から見ると、一般的な産業用ヘルメットとは異なり登山用のため、ABS 樹脂と EPS に穴を開けることで通気性が確保されている。

4 衝突試験

4・1 衝突試験装置

本研究では、直径 50mm 以下の飛翔体発射が可能な衝突試験装置を開発した。装置の概略を Fig. 3 に示す。装置は試験体設置部の前後部にチャンバーを持つデュアルチャンバー (スペース・ダイナミクス研究所製, MCIF-2VP-S) を用いた。衝撃緩衝材をチャンバー内部の側面全体に設置しており、衝突後の飛散物の二次衝突からチャンバー内を守ることによって安全な実験が可能である。射出管は内径 50 mm, 全長 2 m のステンレス合金製のホーニング管を使用した。タンクに貯めた圧縮空気を手動バルブで開放することで、この射出管に装填した飛翔体を射出する。なお、本研究では、試験を簡便に行うために、飛翔体を保護するサボを分離せずそのまま衝突させている。サボ単体で 100 m/s を超える衝突試験を行ったが、サボは破壊し、後述する加速度センサでは加速度が測定されなかった。この際、ヘルメットの表面には損傷がないことを確認している。よって、サボのヘルメットへの衝突の影響は軽微であると判断した。

射出管の出口付近に、コイル (直径約 60 mm, 70 巻) を 20 mm 間隔で 3 本設置した。飛翔体に取り付けたネオジム磁石のコイル通過時に発生する誘導起電力を利用したマグネット・コイル法¹⁶⁾により飛翔体の速度算出を可能にした。

4・2 人頭モデル

本研究では、登山用ヘルメットを装着した人体頭部への衝突時に作用する加速度を基にヘルメットの安全性評価を行う。衝撃負荷を受けた頭部への影響は、輸送機器等の交通事故、転倒、転落において、自動車試験用人体ダミー (例えば Hybrid-III 50th 等) の頭部を使用することが多い。しかし、本研究では、衝突試験により、ヘルメットを

貫通して、頭部モデルを破壊する恐れがある。

そこで、頭部および頭部から成るアルミニウム合金製 (AC3A: Al-Si 系合金) 人頭モデルを自作した。発泡高分子材料でできた頭部を利用して鋳造にて造形し、内部を切削加工し空洞を作ることで、頭部 5.2 kg, 頸部 3.9 kg とした。この空洞部の後頭骨内側の位置に 3 軸加速度センサ (PCB 製, 350B50, 最大加速度 $\pm 98000 \text{ m/s}^2$) を設置した。本研究では、3 軸加速度センサは、Fig. 3 中に示した x 軸, y 軸, z 軸になるように設置しており、それぞれ正の方向が解剖学的正位における下方向, 左方向, 前方向となる。加速度の計測は、オシロスコープ (横河計測製, DLM4038) で行った。

4・3 試験および評価方法

本研究では、火口から高所に噴き上げられた火山れきが落下することを想定し、ヘルメットの頭頂部に模擬火山れきを衝突させる。そこで、登山用ヘルメットを装着した頭部モデルを、Fig. 3 中に示すように高強度な糸で吊り下げてデュアルチャンバーの中間部の設置部にした。糸で吊るすことで、飛翔体衝突時には、3 軸方向にほぼ自由に動くことが可能である。

模擬火山れきを約 40~80 m/s で頭部モデルに衝突させた。実際の火山れきの飛散速度は、噴火の規模やその様相により変化することから決定が難しい。そこで、2014 年御嶽山噴火の状況を想定し、標高 3000 m で水蒸気噴火が生じた際の終端速度を考える。火山れきは、回転しながら落下する直径 $d=30 \text{ mm}$ の球形と仮定し、重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$, 標高 3000 m における標準大気密度 $\rho=0.909 \text{ kg/m}^3$, 火山れき密度 $\rho_s=2400 \text{ kg/m}^3$, 抗力係数 $C_D=0.4$ として、以下の式¹⁷⁾から終端速度 $v_t \text{ (m/s)}$ を算出する。

$$v_t = \sqrt{\frac{4g}{3C_D} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) d} \quad (1)$$

算出した結果、終端速度は約 51 m/s となる。また、人体が重篤となる確率が非常に高くなるエネルギーは、古くから 79 J がよく利用されている。¹⁸⁾ このエネルギーを基準とすると、衝突速度は約 67 m/s となる。本研究では、これら速度での衝突安全を目安として、実験結果の考察に用いる。

また、衝突時の人頭モデルの 3 軸加速度を計測し、同時に登山用ヘルメットの破損状態を確認した。本研究では、飛翔体衝突が人体に与える影響を頭部モデルに加わる加速度から導き出される頭部損傷基準値 (Head Injury Criterion: HIC)¹⁹⁾を用いて評価した。HIC は次式から算出できる。

$$\text{HIC} = \left\{ \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_R(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{\max} \quad (2)$$

ここで、 t_1 と t_2 は積分時間間隔 $t_2 - t_1$ が 15 ms を超えない範囲で HIC が最大となるように選んだ。 $a_R \text{ (G)}$ は実験で得

Fig. 4 Relationship between acceleration and time. (a) 44.4m/s: No.1, (b)74.0m/s: No.14 in Table 1.

られる同時刻の3軸方向加速度の合成値であり、以下の式を用いて算出した。

$$a_R(t) = \frac{\sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2 + a_z(t)^2}}{9.8} \quad (3)$$

ここで、ある時刻におけるx軸、y軸、z軸方向の加速度(m/s²)をそれぞれ $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ 、 $a_z(t)$ とする。

HICは統計値として人体頭部が重大損傷を受けるとされる数値が存在するが、本研究で作製した人頭モデルは頭部の質量が大幅に加味されるため、本実験では頭部のみより低い加速度で挙動する。よって、HICは統計値と比較せず、人体に与える影響の大きさを相対的に評価する指標として利用する。そこで、飛翔体衝突によって頭部モデルを損傷させないように加速度を与える手段として、木製ハンマーを用いてヘルメット無しの状態に最大限の人力で頭頂部を打撃した。その結果、HICは平均216を示した。本頭部モデルでは、安全率を考慮して、HIC=100を安全性の目安とする。

本研究では、各実験条件におけるヘルメットの安全性評価結果を3通りに分類した。HICが100以下かつヘルメットが破壊しない状態を◎、HICが100以下であるがヘルメット表面が破壊している状態を○、ヘルメットの損傷の有無に関わらずHICが100を超えた場合を×と定義する。よって、◎と○はヘルメット表面の破損の有無の

Table 1 Summary of experimental results. *Measurement error due to oscilloscope overrange.

No.	Impact velocity (m/s)	Impact energy (J)	HIC	Safety evaluation
1	44.4	36.9	1.43	◎
2	47.6	42.4	0.89	◎
3	48.2	43.4	0.85	◎
4	49.4	45.6	1.01	◎
5	49.4	45.6	4.93	○
6	52.6	51.7	1.34	◎
7	54.8	56.1	10.2	○
8	57.1	61.0	1.56	○
9	58.8	64.6	3.88	○
10	60.6	68.7	3.69	○
11	60.6	68.7	10.60	○
12	69.0	89.0	278 or more*	×
13	74.0	102.4	38.3	○
14	74.0	102.4	229	×
15	80.0	119.6	1095	×

みで、人体への影響は軽微とし、安全と判断する。

実際の衝突現象を可視化するために、前方チャンバーに設置した窓からハイスピードカメラ（ナックイメージテクノロジー製、HX-3）を用いて斜め方向から模擬火山れきが登山用ヘルメットに衝突する様子を撮影した。撮影条件は、撮影速度 5000 fps、画素 1600×1200 ピクセルである。

5 実験結果および考察

5・1 3軸加速度の測定結果

衝突試験から得られた頭部モデルの3軸加速度と時間の代表的な関係として、低速衝突（44.4 m/s：後述の Table 1 における No.1）と高速衝突（74.0 m/s：後述の Table 1 における No.14）の結果を Fig. 4 に示す。時間軸はオシロスコープのプリトリガのタイミングに依存した生データとなっている。頭部モデルの動きを見ているため、ヘルメットに衝突した直後から加速度が生じているわけでないことに注意が必要である。

低速衝突の結果（Fig. 4(a)）を見ると、あるタイミングでほぼ同時に3軸方向の加速度が検出されることがわかる。飛翔体はx軸の正の方向に向かって射出しているため、x軸の加速度ピークが一番大きく持続時間が長い出力となった。なお、y軸およびz軸については、頭頂部の衝突箇所によってその大きさが変化する結果を得ている。x軸方向の大きなピーク値の後は、それぞれの方向に高い周波数の加速度が生じている。一方、高速衝突（Fig. 4(b)）では、最初に現れるピークは低速衝突と同様にx軸方向であるが、その値より非常に大きなピークがz軸方向で繰り返し見られた。詳細な観察結果は後述するが、No.14は飛翔体が衝突部で深く突き刺さっていたことから、飛

Fig. 5 Image comparison extracted from high-speed camera shooting of No. 2 and No. 15 in Table 1.

翔体の運動エネルギー（衝突エネルギー）が登山用ヘルメットを介して頭部モデルに大きな慣性力を与えることで回転運動が生じ、大きく揺れたことが原因と考えられる。

5・2 登山用ヘルメットの安全評価

各衝突速度条件における飛翔体の衝突エネルギー、HIC、ヘルメットの安全性評価の判定結果を Table 1 にまとめる。主に、約 40～50 m/s の衝突速度領域では◎、約 50～60 m/s の衝突速度領域では○、これ以上の速度領域では×となる傾向が見られた。よって、終端速度（51 m/s）においては登山用ヘルメットの装着により火山れきに対する衝突安全性が高まることが実験的に明らかになった。実際には約 60 m/s まで○の結果となり、安全裕度を有している。また、試験回数関係で正確な境界点は断定できないが、60.6 m/s（No. 11）と 69 m/s（No. 12）を境目に HIC が

Fig.6 Relationship between HIC value and impact energy. The dashed line in the figure indicates 79 J as a criterion proposed in Ref. 18).

大きく増加する結果となった。

Fig. 5 に◎を示した No.2 と×の中で最大の HIC を示した No.15 のハイスピードカメラ映像の比較を示す。No.2 では、衝突により表面の ABS 樹脂を破壊することなく、衝突により接触部で大きな変形が生じ、この変形が周りに伝ばする様子が見られた。抽出した画像のみではわかりにくいですが、この変形の後にヘルメット全体が振動している様子が観察された。変形が広範囲に生じることが衝撃緩衝に寄与していると考えられる。一方、No.15 は表面の ABS 樹脂が破壊し、飛翔体が突き刺さった。衝突直後からの表面の変形は No.2 に比べて範囲が狭い。この突き刺さりにより x 軸方向に大きな負荷が生じ、高い HIC を示したと考えられる。

5・3 登山用ヘルメットの破損状態とHICの関係

Fig. 6 に HIC と衝突エネルギーの関係を示す。図中の赤線で示す 79 J 付近を境にして HIC は衝突エネルギーに対し指数関数的に上昇している。そこで、衝突エネルギー 79 J 付近の HIC が高い場合と低い場合のヘルメットの破損状態を比較し、ヘルメットの破損様相と HIC の大小の関連性を探す。なお、ヘルメットの裏面は、EPS の変形および破壊の様子を観察するために、Fig. 2 で見られる面ファスナーで取り付けられている頭部接触保護部材を取り外した。

衝突エネルギー 79 J を境目に HIC が低い場合（No.10）と高い場合（No.12）のヘルメットの破損状態を Fig. 7 に示す。表面の ABS 樹脂は、HIC の値に関わらず破壊されており、HIC が高い場合は飛翔体が突き刺さったままの状態となっている。裏面を見ると、HIC の有無に関わらず、衝突箇所はヘルメット後頭部側であるが、その様子は異なる。HIC が低い場合、衝突箇所直下の EPS の割れやき裂とともに後頭部側もき裂が生じており、広範囲に破壊が生じていることがわかる。一方、HIC が高い場合は、HIC が低い場合に比べて破壊している面積は増えているが、同時に割れやき裂は衝突部に限られ、局所的な破壊となっている。

(a) No. 10

(a) No. 13

(b) No. 12

(b) No. 14

Fig. 7 Comparison of damage conditions in helmets when HIC around 79J is low (a) and high (b).

Fig. 8 Comparison of damage conditions in helmets when HIC is low (a) and high (b) with the same impact energy higher than 79J.

次に衝突エネルギーが 79 J 以上で等しいが HIC が大きく異なった 2 つ (No.13 および 14) を比較する。Fig. 8 にこの 2 つのヘルメットの破損状態を示す。表面は、HIC の値に関わらず破断が生じ、飛翔体が突き刺さった。裏面では、HIC が低い方は前述の No.10 と同様に衝突箇所がヘルメット後頭部側であり、EPS の割れやき裂が広範囲に生じている。一方、HIC が高い場合は、No.12 の結果と同じように割れやき裂は衝突箇所直下に限られ、局所的な破壊が生じている。

一方、一番大きな HIC を示した No.15 は、表面の ABS 樹脂および内部 EPS を貫通し、頭部モデルの頭頂部に衝突した痕跡が見られた。HIC の値に関わらず貫通により頭部に衝突することは、この速度域ではヘルメット着用の効果が低いことを示している。

上記の結果より、使用した登山ヘルメットでは、衝突箇所によって内部の EPS の破損状態が変化し、これが HIC の値に影響を及ぼすことが明らかになった。前述の通り、本研究で使用した登山用ヘルメットは、滑落、落石等の対策や登山用ヘルメットの規格によって材料や内部構造が設計されている。特に、衝撃については、2m からの落錘試験のみで、その速度は約 6.3 m/s と本研究で行なった速度と比較して低速である。この程度の変形速度では、変形伝播速度は変形速度より十分速く、変形領域は広範囲に分散される。一方、高速衝撃では、衝撃吸収を期待していた発泡材料の変形が全体に広がる速度よりも衝突速度の

方が速くなり、変形が分散する前に表面 ABS 樹脂が局所変形し、貫通してしまったと考えられる。

よって、これまでの登山用ヘルメットの設計で、直径 30 mm までの火山れきに対しては、十分な耐衝撃安全設計がなされていると考えられる。一方で、実験結果より、内部保護用の発泡材料の変形と破壊を局所から分散させることが HIC 低減に大きく寄与する可能性がわかった。衝撃吸収構造を改善することで、より高い衝突エネルギーに耐えられる登山用ヘルメットの開発が期待できる。

6 結 言

本研究では、直径 50 mm 以下の飛翔体を発射できる衝突試験装置と自作の人頭モデルを用いて、市販されている登山用ヘルメットの衝突安全性評価を行い、以下のことがわかった。

- (1) 本研究で使用したヘルメットの頭頂部に直径 30 mm 相当模擬火山れきを衝突させたところ、衝突速度約 60 m/s までは低い HIC を示し、安全性を担保することがわかった。
- (2) 模擬火山れきがヘルメットの表面を貫通しても HIC の値に差が生じた。内部の保護用発泡材料が広範囲に破壊すると低い値を示し、局所的に破壊すると高い HIC を示した。よって、人体への影響を低減させるためには、内部保護材料の破壊プロセスの影響が大きく現れることが示唆された。

今後、火山れきの最大直径である 64 mm を基準として、さらに衝突安全が向上した登山用ヘルメットの開発

が課題である。

3 軸加速度センサを用いた測定について, 防衛大学校機械工学科 藤原浩幸 氏から多くのご助言をいただいた。また, デュアルチャンバーの組み立てには, 防衛大学校理工学研究科機械工学専攻 酒井大誠 氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Japan Meteorological Agency, <https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/volsaigai/saigai.html> (accessed on 17 April 2021).
- 2) G. Wilson, T.M. Wilson, N.I. Deligne and J.W. Cole, “Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 286 pp.148-182 (2014).
- 3) T. Oikawa, K. Yamaoka, M. Yoshimoto, S. Nakada, Y. Takeshita, F. Maeno, Y. Ishizuka, J. Komori and S. Nakano, “The 2014 eruption of Ontake volcano, central Japan”, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, Vol. 60, pp.411-415 (2015).
- 4) T. Kaneko, F. Maeno and S. Nakada, “2014 Mount Ontake eruption: characteristics of the phreatic eruption as inferred from aerial observations”, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, 72 (2016).
- 5) T. Oikawa, M. Yoshimoto, S. Nakada, F. Maeno, J. Komori, T. Shimano, Y. Takeshita, Y. Ishizuka and Y. Ishimin, “Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews”, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, 79 (2016).
- 6) H. Yamada, K. Tateyama, H. Sasaki, S. Naruke, H. Kisimoto 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*, Vol. 359, pp.37-46 (2018).
- 7) H. Yamada, K. Tateyama, R. Honda, M. Yoshimoto and T. Fujii, “Simple structural reinforcement of roof of wooden buildings subjected to ballistic ejecta impact”, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, Vol. 64, pp.243-251 (2019).
- 8) K. Tateyama, S. Naruke, H. Sasaki, T. Fukui and H. Yamada, “Impact resistance evaluation of tatami to improve the safety of mountain huts”, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, Vol. 65, pp.41-51 (2020).
- 9) Disaster Management, Cabinet Office, http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryo/pdf/201512_hinan_tebiki3.pdf (accessed on 17 April 2021).
- 10) Disaster Management, Cabinet Office, http://www.bousai.go.jp/kazan/kazan_sonae/index.html (accessed on 17 April 2021).
- 11) Kiso Town, Nagano Prefecture, <https://www.town-kiso.com/bousai/bousai/100206/100208/> (accessed on 17 April 2021).
- 12) Kagoshima City, Kagoshima Prefecture, <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kurashi/bosai/bosai/sakurajima/documents/bousaibook.pdf> (accessed on 17 April 2021).
- 13) UIAA Safety Standards, UIAA 106 (Helmets).
- 14) European Standards, EN 12492: 2012 (Helmets for mountaineers).
- 15) Ministry of Health, Labor and Welfare, https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=74066000&d ataType=0&pageNo=1 (accessed on 17 April 2021).
- 16) K. Watanabe, “Phenomena induced by high-speed impact to particulate materials”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 66, pp.288-291 (2017).
- 17) R. Gunn and G.D. Kinzer, “The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air”, *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 6, pp.243-248 (1949).
- 18) M.V.D. Voort and E.L. Baker, “Ballistics trajectory and impact analysis for fragment impact testing insensitive munitions and hazard classification project criteria”. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1979, 120007 (2018).
- 19) R. Eppinger, E. Sun, F. Bandak, M. Haffner, N. Khaewpong, M. Maltese, S. Kuppa, T. Nguyen, E. Takhounts, R. Tannous, A. Zhang and R. Saul, “Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems – II”, Chap. 2 Head Injury Criteria (1999) National Highway Traffic Safety Administration.