火山噴火緊急時の現地状況把握に向けた四足歩行ロボットの走行試験

LOCOMOTION TESTING OF A QUADRUPED ROBOT FOR ON-SITE SITUATION ASSESSMENT DURING VOLCANIC ERUPTION EMERGENCIES

矢渡 岳[1]・植 弘隆[1]・平川 泰之[1]・有間 航[1]・光永 海斗[1]
矢野 敦久[2※]・中村 良一[2]・中水流 晃[2]・井上 遥[2]
Gaku YAWATARI, Hirotaka UE, Yasuyuki HIRAKAWA, Wataru ARIMA, Kaito MITSUNAGA, Atsuhisa YANO, Ryoichi NAKAMURA, Akira NAKAZURU and Haruka INOUE

[1]株式会社オリエンタルコンサルタンツ九州支社（〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 3-2-8）
E-mail: yawatari@oriconsul.com
[2]国土交通省九州地方整備局九州防災・火山技術センター（〒830-8570 福岡県久留米市高野 1-3-1）
※現所属：国土交通省関東地方整備局河川部河川計画課（〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心 2-1）

***Key Words**: quadruped robot, field demonstration, volcanic ash deposit area, rough terrain locomotion, restricted area*

1. はじめに

火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドライン[1)]では，緊急減災対策実行計画に示した対策を実施可能なものとするために，平常時からの準備事項の検討が示される．平常時からの準備事項として，「緊急減災対策の実効性の向上のため，立入規制範囲での迅速かつ着実な作業の実施や，作業員の確実な安全を確保できるように，新技術を活用した新たな手法について，引き続き，調査，研究を進めるものとする」ことが求められている．

それに供する調査手法として，噴火時を想定したUAV飛行試験や，噴火時におけるUAVを活用した降灰厚等の調査手法のような，UAV の活用を主とした検討が行われている[2)]．しかし，UAV による調査では，離発着地点から目標地点までの見通しや遮蔽物，天候（風速，降雨有無）によっては飛行が困難なことが確認されている[3)]．また，降灰厚調査では，噴火を想定して事前に設置した降灰マーカーを，対地高度を保った状態でカメラズーム機能を活用し確認する方法が検討される[4)]が，噴煙下や悪天候時の様な視界不良時は，UAV を用いた確認が実施できない．

近年では，建設現場における施工品質や安全管理，出来形管理等の保守・点検・巡視での四足歩行ロボットの活用が進められている[5)]．また，海外では，急傾斜地（40°），泥濘地，砂丘等での走行試験[6)]や，火山地帯といった人が立ち入れない環境での，火山ガス測定を目的とした四足歩行ロボットの活用検証が進められる[7)]．しかし，国内では，砂防現場の様な土石流発生後の不整地での現地調査や，さらには降灰後の火山灰堆積地での活用可能性について，走行時の降灰厚に着目した実証実験等は行われていない．

本研究では，火山噴火時や噴火後の降灰状況，および降雨後の渓流内の土砂移動状況の把握を目的とし，四足歩行ロボットが立入規制区域外から自走して立入規制区域内に進入し，現地状況を確認する場面を想定した．その適用可能性を検討するための基礎検討として，四足歩行ロボットの走行性能に関する走行試験を行った．具体的には，人工的に作成した火山灰堆積地および土石流発生後の自然河道を対象として，四足歩行ロボットの走行可否および走行限界の把握を目的とした実証実験を行った．

なお，本研究の一部は，令和 8 年度砂防学会研究発表会で発表したものである．

2. 試験方法

(1) 使用機体

使用機体は，今後，火山噴火や大規模災害時といった緊急時に活用する上で，サプライチェーンリスクが海外製品と比較して低く，実験結果等を踏まえた用途に応じた改良・改善対応が行いやすい国産ロボットとした．

実証実験には，国産ロボットである HLQPro【開発段階】(株式会社 Highlanders 開発)を使用した．使用した HLQ Pro を**図-1** に，基本性能を**表-1** に示す．

(2) 実施場所及び走行コース

走行コースは，火山灰堆積コースと自然河道(堆積地内)コースの 2 種類のコースを設定した．

火山灰堆積コースを整備する上で火山灰の調達が容易であり，複数の道路勾配と十分な延長が確保可能であるため，桜島南西部に位置する，野尻川上流の野尻川 7 号砂防堰堤の管理用道路および工事用道路を走行試験場所として選定した．これらの道路上に一定厚の火山灰を敷設(**図-2**)し，火山灰堆積地における走行試験を実施した．火山灰堆積地を想定したコースの敷設延長・幅については，既往の四足歩行ロボットで実施された試験コースを参考にした．既往走行試験 [8] では，コース中央付近で走行不可となる場合も確認されたため，走行コースに一定距離が必要と考え，コース延長 3.6m，コース幅 1.0m とした．

自然河道(堆積地内)コースは，同堰堤の堆砂敷において土石流発生後の自然河道を想定して走行試験を実施した(**図-3**)．

(3) 使用火山灰

火山灰堆積地における走行試験には，野尻川の隣接渓流である春松川第 7 砂防堰堤堆砂敷に堆積した火山灰(中央粒径 0.2mm，最大粒径 2mm)を使用した．**図-4** に今回使用した火山灰の粒径加積曲線を，既往調査 [9] による桜島火山灰の粒度曲線と重ねて示す．既往調査による 2 本の粒径加積曲線の内，細粒なものと比較すると，本研究で使用した火山灰の粒径加積曲線の粗粒部分はほぼ一致しているが，細粒部分はかなり少ないことが分かる．これは，今回使用した火山灰が砂防堰堤堆砂敷から取得したものであり，細粒分が流出しているためと考えられる．また，粒度分布の多くは砂分(細粒，中砂)であり，水締めしやすい特性を有すと考えられる．

表-1　基本性能一覧

サイズ	88×44×57 cm
重量	約60kg
防水・防塵機能	IP54
可搬重量	20kg
登坂角度	35度
最大走行速度	9km/h
稼働時間	4時間



図-1　使用機体 HLQ Pro【開発段階】



図-2　走行試験コース（人工的な火山灰堆積地）



図-3　走行試験コース（堆砂敷）

(4) 走行試験条件

火山噴火時の現地状況確認への適用が可能であるかの検討を念頭に，下記の 2 コースで走行試験条件を設定した．

a) 火山灰堆積コース

火山灰堆積コースでの走行試験では，コース勾配，火山灰堆積厚，路面状態の 3 条件を変化させ，人工コースを作成した．

コース勾配は，平坦路，10%，25%の 3 ケースとした．10%は，既往研究[10]において行われた一定の火山灰堆積下での自動車走行試験での車両（二輪駆動）の走行が困難となった条件との比較を目的として設定した．25%は，クローラ車両が走行する除石坂路での走行を想定して設定した．

火山灰堆積厚は，10cm，20cm，30cm の 3 ケースとした．30 cmは，四足歩行ロボット機体脚部の膝関節の地上高が約 30cm であることを踏まえ，火山灰の堆積厚が 30cm に達した場合には走行が困難となることを想定して，堆積厚の上限値として設定した．走行試験では，走行可と走行不可の境界となる火山灰堆積厚を把握したかったため，はじめに堆積厚 20 cm で走行試験を実施し，走行可なら 30 cm，走行不可なら 10 cmで試験を実施した．火山灰をコース内に投入する際は，締固めをせず，表面を均すのみとした．

路面状態は，火山灰降灰後の未散水状態，および降雨時の泥濘化を想定した散水状態（**図-5**）の 2 ケースで実施した．ただし，散水状態については，使用火山灰の粒度が粗く，浸透が良好であったため，十分な泥濘化が得られたのは，コース勾配が平坦路の時の火山灰堆積厚が 10cm の 1 ケースのみであった．

b) 自然河道（堆砂域内）コース

河床内の走行試験は，野尻川第 7 号砂防堰堤の堆砂域で実施した．走行試験（10 月 7 日）の直前の 9 月 29 日に土石流が発生しており[11]，60 cm程度の巨礫含みの土石流堆積物が多数残存していた．なお，後述するが，四足歩行ロボットの火山灰堆積コースでの走行結果を踏まえ，河床内の走行試験は堆積地内の礫を回避した砂地 30m 程度を走行させた．

3. 結果と考察

(1) 火山灰堆積コースの走行試験結果

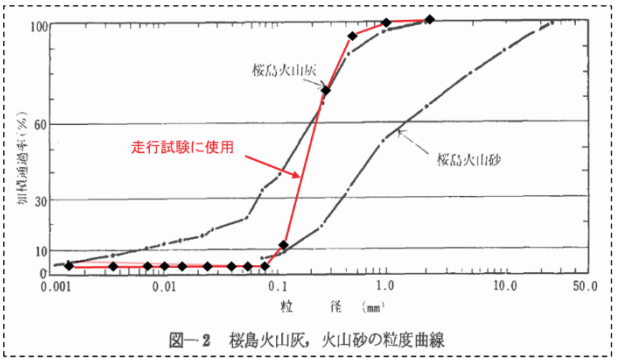
走行試験結果の一覧を**表-2** に示す．なお，3.6m の走行コースを完走した場合を「走行可」と判定した．

道路勾配が平坦路の場合，火山灰堆積厚が 10cm のケースでは，未散水状態および散水状態の両条件下で走行可能であった．しかし，火山灰堆積厚が 20 cm のケースでは，未散水状態で走行不可となった．

道路勾配が 10%の場合，未散水状態の火山灰堆積厚が 20 cmのケースでは，走行可能であった．一方，未散水状態の火山灰堆積厚が 30 cmのケースでは，走行不可であった．

道路勾配が 25%の場合，未散水状態の火山灰堆積厚が 10 cmのケースでは，走行可能であった．一方，未散水状態の火山灰堆積厚が 20 cmのケースでは，走行不可であった．

このように，道路勾配が同一の場合，火山灰堆積厚が大きくなるほど，走行不可となった．上限値として設定した火山灰堆積厚 30cm の場合は，全条件で走行不可であった．



図―2　桜島火山灰，火山砂の粒度曲線

【出典：桜島火山灰砂の物理的諸性質／春山元寿・下川悦郎・井上利昭】に一部加筆

図-4　使用した火山灰の粒径加積曲線



図-5　平坦路コース・火山灰 10 cm堆積・散水後状況

表-2　火山灰堆積コースでの走行試験結果

道路勾配	道路状態	火山灰厚さ（cm）		
		10	20	30
平坦路	未散水	○	×	―
	散水	○	―	―
10%勾配	未散水	―	○	×
25%勾配	未散水	○	×	―

○：走行可、×：走行不能、―：実施なし

一方で，火山灰厚さが同じ条件で比べると，道路勾配が急勾配になっても，火山灰堆積厚が 10 cmであれば走行可能であった．しかし，火山灰堆積厚が20cmの場合，平坦路と道路勾配 25%の時に走行不可となり，道路勾配 10%では走行可能であった．これは，後述するが，脚部接地時の火山灰圧縮，締固めによる影響が想定される．

なお，火山灰堆積コースでの走行試験実施時は，土のうを乗り越えてからコースに進入する必要があったが，本走行試験においては，土のうの乗り越えが出来ず，合板等による補助を要した（**図-6**）．

(2) 自然河道（堆砂敷内）コースの走行試験結果

火山灰堆積コースでの走行試験の実施結果より，現段階では段差や礫の乗り越えが困難であり，巨礫等を乗り越えた走行が不可能であると判断し，堆積地内の礫を回避した砂地で走行試験を実施した．

土石流堆積後の河床部での走行は，比較的平坦な砂地を一定距離走行できたが，段差部でバランスを崩して転倒してしまった（**図-7**）．自力での復帰ができないため，操作者による介助を要した．

また，土石流堆積後の河床部での走行では，30m 程度走行して転倒したため，長時間連続稼働でのバッテリー消費率の把握はできていない．今後は，複数の現地環境下でそれぞれ長時間連続稼働によるバッテリー消費率を把握し，現地での稼働時間を把握することが望まれる．

(3) 走行試験結果からの考察

a) 蹴り上げ高

今回の実証実験の中では，火山灰堆積コースでの走行試験実施時に土のうを乗り越えられなかった．また，火山灰堆積厚 10cm では走行可能であったが，20cm ではほとんど前進することができなかった．火山灰堆積厚が厚くなることに伴い，走行が困難になった主な要因として，蹴り上げ高が考えられる．HLQ Pro 【開発段階】の蹴り上げ高は約 6cm であり，火山灰堆積厚 20cm 以上では，蹴り上げ高が小さいため，歩行しようとするたびに，脚部が火山灰中に埋没していき，引き抜きが困難となり，前進が阻害されたと考えられる（**図-8**）．

堆砂敷内における走行試験での転倒時も，蹴り上げ高が小さく，基本的に移動がすり足歩行のような状態となっていたため，起伏の小さな段差でも転倒が生じたと考えられる．

b) 火山灰締固めの影響

火山灰堆積厚 20cm の条件において，平坦路では走行不可であったが，道路勾配 10%の条件では走行可能であった．この原因としては，複数回走行試験を行う中で，火山灰が締め固められ，走行試験結果に影響を及ぼした可能性がある．ただし，本結果は今回の



図-6　土のう乗越え状況



図-7　河床部での走行状況

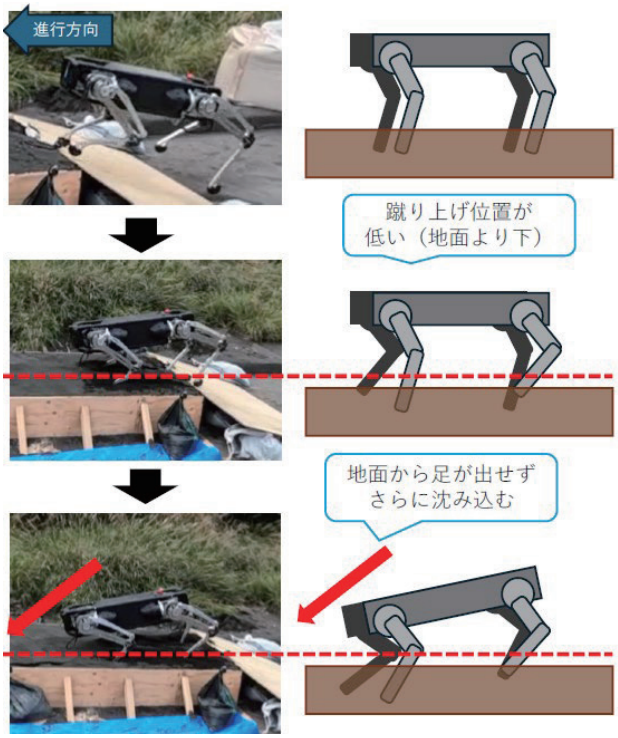


図-8　蹴り上げ高による火山灰堆積地での走行への影響

一回の実験に基づくものであり，偶然による影響も否定できない．今後は，同一条件下で複数回走行試験を行い，走行の再現性や成功率を検証することが必要であると考える．

c）姿勢制御能力

堆砂敷内における走行試験での転倒要因は，不安定地盤における姿勢制御能力の不足が要因と考えられる．歩行時に不安定な礫や浮石に脚部が接地し，その足場が崩れ，転倒しそうになった際に，態勢を修正する能力（脚さばき，脚元の礫が崩れた時のバランス復元）を向上させることで，巨礫等が存在する堆砂敷内の歩行も可能になると考える．

4. まとめと今後の展望

(1) 火山灰での走行

火山灰堆積コースでの走行試験結果より，火山灰堆積厚が 10cm 以下の条件では，一部未実施のケースもあるが，勾配条件が厳しいケースで走行が可能なことを踏まえれば，基本的には路面状態や勾配に依らず走行が可能であった．一方，堆積厚 20cm では走行可否が分かれ，30cm では全条件で走行不可となった．これより，四足歩行ロボットの走行可否は堆積厚に依存し，現段階の開発モデルでは実用上の適用限界は 10～20cm 程度に存在することが示唆された．

また，車両（二輪駆動）における自動車走行試験では，火山灰堆積厚 10cm で登坂走行が困難であった[10]．自動車走行試験結果との比較より，蹴り上げ高の改良等により，車両では到達困難な領域に対しても，四足歩行ロボット適用可能性が示唆される．なお，メーカーへのヒアリングによれば，走行試験以降の開発により，蹴り上げ高の改善が進められているところである．

なお，今回の実証実験に用いた火山灰は 1 種類のみであり，細粒分が抜けた粒度の揃ったものであった．そのため，今後，火山噴火時での活用を想定する上では，火山灰の粒径が細かい条件から粗い条件まで，走行試験を実施する必要がある．また，火山灰堆積コースでの走行試験は各条件で 1 度の実施であったため，再現性や走行のばらつき，成功率を評価するためにも同一条件下で複数回の走行試験を行う必要がある．

(2) 自然河道（堆砂敷内）での走行

堆砂敷内での走行試験結果より，不整地条件下での走行においては，礫等の滑動による踏み外し時の姿勢回復が課題であることが確認された．姿勢修正能力を改善することで，障害物等により転倒しそうになった場合でも，バランスを復元することができれば，転倒を回避し，操作者の介助が不要となる．また，礫等の障害物や不安定な足元を検知し，事前に走行を回避することができれば，多様な現地環境下でも走行が可能になると考えられる．

今後は，ソフトウェア面において，状況に応じて高速走行，複雑な地形での歩行，転倒時の自力復帰の各動作を学習した AI モデルを搭載し，走行環境に応じて最適なモデルへ自動的に切り替える設計についての開発が望まれる．また，メーカーへのヒアリングによれば，今後，人間が地形を目視で判断し，歩行経路を選択するような思考過程を模した，経路計画に関する AI 開発を進めていくところである．これらの開発が進めば，自律走行等によって，四足歩行ロボット単体で立入規制区域等での作業が可能となることが期待される．

(3) 実用化に向けた展望

a）現状の課題

四足歩行ロボットを用いた走行実験の事例は少なく，今回用いた HLQPro との走行性能の比較は難しい．そこで，施工現場等で活用が進む四足歩行ロボットを対象に，メーカーで掲載される動画やカタログを踏まえた走行性能を**表-3** に示す．なお，**表-3** の値はあくまでカタログスペックでの段差乗り越え能力のため，参考としての比較となる．

今回使用した HLQPro【開発段階】は，カタログスペックでは段差乗越え能力が 30cm となっていたが，実際の蹴上げ高は 6cm であったため，平坦路での火山灰堆積 20cm は走行不可であった．そのため，他のロボットも同様の可能性はある．しかし，少なくとも UnitreeB2 と Spot，ANYbotics は，メーカーサイトの動画で目測 20cm 程度の蹴上げ高が確認できるため，それらの機器と比較すると，HLQPro【開発段階】の蹴上げ高 6cm というのが弱みであることが分かる．一方で，先述の四足歩行ロボットを含めてほ

表-3　四足歩行ロボットごとの段差乗越え能力

開発会社	製品名	サイズ	重量	段差乗越能力	最大登坂角度
Highlanders（日本）	HLQ Pro	88×44×98cm	約60kg	30cm	35 度
Unitree（中国）	Unitree B2	110×45×64.5cm	約60kg	40 cm	45 度
Boston Dynamics（アメリカ）	Spot	110×50×84cm	約32kg	30 cm	30 度
ANYbotics（スイス）	ANYmal	93×53×89cm	約58kg	25 cm	30 度



図-9　四足歩行ロボットで撮影した画像

とんどが海外製であり，サプライチェーンのリスクの面では国産であることが強みとなる．

b）今後の展望

河床走行時に四足歩行ロボットにカメラを搭載し取得した画像を**図-9**に示すが，点検等にも活用可能と考えられる．四足歩行ロボットにカメラや3DLiDAR等を搭載することで，災害時の状況把握や平常時の施設点検への活用が可能になると考える．

さらに，火山噴火緊急減災対策での実用を考えると，災害現場等の事前の地形データが無い新しい地形環境での自律走行や，衛星通信を活用した遠隔操縦，通信途絶時の指定箇所への自動帰還といった機能が求められる．四足歩行ロボット単体，もしくは遠方からの操作のみで完結するような運用方法の確立が，実用化に向けては必要になってくると考える．

謝辞：本実証実験の実施に当たり，走行試験フィールドとして，野尻川7号砂防堰堤管理用道路および堆砂敷を国土交通省 九州地方整備局 大隅河川国道事務所 桜島砂防出張所にご提供いただいた．ここに記し感謝いたします．

参考文献

1）　国土交通省 砂防部：令和5年3月火山噴火緊急減災対策砂防計画策定ガイドライン

2）　新田寛野，佐藤厚慈，鳥田英司，滝澤雅之，大木鉄夫，竹下一路，園田明花里：UAVを活用した降灰観測施設の自動点検，第75回 令和8年度砂防学会研究発表概要集，pp.455，2026.

3）　中家健吾，池田暁彦，河野元，片山小裕美，石井崇，岡嶋康子，真安智大，皆川淳，金井啓通：焼岳噴火時における降灰厚等を把握するための UAV 飛行試験について，第74回 令和7年度砂防学会研究発表概要集，pp.355，2025.

4）　片山小裕美，池田暁彦，河野元，中家健吾，石井崇，岡嶋康子，真安智大，皆川淳，金井啓通：焼岳噴火時におけるUAVを活用した降灰厚の調査方法について，第74回 令和7年度砂防学会研究発表概要集，pp.357，2025.

5）　大成建設株式会社：四足歩行ロボットの遠隔操作・自律制御による巡回監視システム「T-InspectionX」を開発，https://www.taisei.co.jp/ ，2024.

6）　Franco Angelini，Pierangela Angelini，Claudia Angiolini，Simonetta Bagella，Fabio Bonomo，Marco Caccianiga，Cosimo Della Santina，Daniela Gigante，Marco Hutter，Thrishantha Nanayakkara，Paolo Remagnino，Diego Torricelli，Manolo Garabini：Robotic Monitoring of Habitats: The Natural Intelligence Approach，IEEE Access，2023.

7）　Julia Richter，Turcan Tuna，Manthan Patel，Takahiro Miki，Devon Higgins，James Fox，Cesar Cadena，Andres Diaz，Marco Hutter.：Large-Scale Autonomous Gas Monitoring for Volcanic Environments：A Legged Robot on Mount Etna，arXiv preprint，arXiv:2601.07362，2026.

8）　Simon Godon1，Carlos Prados1，Ahmed Chemori1，Asko Ristolainen1，Maarja Kruusmaa：Walking in Mud: Modelling，Control and Experiments of Quadruped Locomotion，IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2025.

9）　春山元寿，下川，悦郎，井上利昭：桜島火山灰砂の物理的諸性質，鹿児島大学農学部演習林報告，vol.5，pp.65-92，1977.

10）　上條孝徳，小林豊，田方智，木佐洋志，坂井佑介：火山灰上の車両走行性能に関する現地実験，第64回 平成27年度砂防学会研究発表概要集，pp.2-093，2015.

11）　国土交通省 大隅河川国道事務所：令和7年10月9日土石流調査情報（桜島）第10報，2025.

（2026.5.29　受付）