

火山噴火緊急時の安全かつ迅速な現地把握のための四足歩行ロボット活用の実証実験

株式会社オリエンタルコンサルタンツ ○有間航・植弘隆・平川泰之・光永海斗・矢渡岳
国土交通省九州地方整備局九州防災・火山技術センター 矢野敦久・中村良一・中水流晃・井上遙

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では、「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。そこで本研究では、火山噴火時の立入規制区域における現地状況確認への適用を想定し、四足歩行ロボットの走行性能に関する基礎的検討として走行試験を実施した。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験を行った。

2. 試験方法

2.1 使用機体 国産ロボットである HLQ Pro【開発段階】(株式会社 Highlanders 開発)を使用した。機体性能を表-1に示す。

2.2 実施場所及び走行コース 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ことより、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及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-1)し、火山灰堆積地における走行試験をR7年10月に実施した。また、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た走行試験を実施した(図-2)。

2.3 使用火山灰 火山灰堆積地における走行試験に使用した火山灰は、野尻川の隣接溪流である春松川第7号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。

2.4 走行試験条件 (1) 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条件を変化させた人工コースを作成した。①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¹⁾において一定の火山灰堆積下での自動車走行試験で、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。②火山灰堆積厚は、10cm、20cm、30cmの3ケースで実施した。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と想定した。このため、本研究では堆積厚の上限値を30cmに設定した。③路面状態：自然状態及び降雨時の泥濘化を想定した散水状態(図-3)の2ケースで実施した。ただし、散水状態については、粒度が粗く浸透が良いため、十分な泥濘化が得られたのはコース勾配が平坦路、火山灰堆積厚10cmのケースのみである。(2) 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。走行試験直前に土石流が発生して巨礫含みの土石流堆積物が多数残存していた²⁾。

3. 結果及び考察

3.1 火山灰堆積コースでの走行試験結果 走行試験結果の一覧を表-2に示す。火山灰堆積厚が10cmのケースは自然状態でも散水状態であっても、また道路勾配25%の急勾配であっても走行が可能であった。火山灰堆積が20cmでは走行可能と走行不可のいずれの場合もあり、火山灰堆積が30cmでは全条件で走行不可であった。

3.2 河床部での走行試験結果 火山灰堆積コースでの走行試験の実施結果より、不安定な足場状態である大礫堆積地では、走行が

表-1 使用機体「HLQ Pro【開発段階】」の基本性能

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 走行試験コース(火山灰堆積地)



図-2 走行試験コース(堆砂敷)



図-3 路面状態(散水状態)

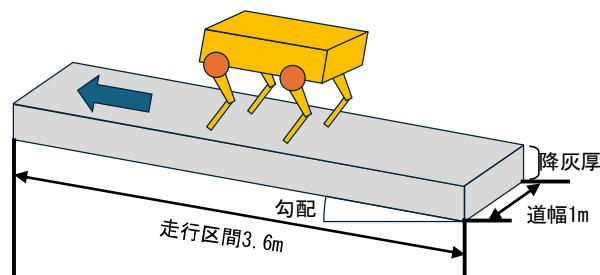


図-4 火山灰堆積地の試験コース模式図

不可能であると判断し、礫を回避した砂地で走行試験を実施した。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（図-5）、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。

3.3 走行試験結果からの考察 (1) 火山灰堆積厚が厚くなると走行が困難となった主な要因としては、蹴り上げ高にあると考えられる。HLQ Pro

【開発段階】の蹴り上げ高は約6cmであり、堆積厚20cm以上では脚部が火山灰中に埋没し、引き抜きが困難となることで前進が阻害された（図-6）。(2) 同一の堆積厚20cm条件において、平坦路では走行不能であった一方、勾配10%の条件では走行可能であった。この要因については現時点で明確ではないが、一例として、勾配10%の条件では脚部接地時に火山灰が斜面下方へ圧縮され、締固めにより地盤反力が増加した可能性が考えられる。一方、平坦路では沈下が全方向に生じることで火山灰が流動し、十分な反力が得られなかった可能性がある（図-7）。ただし、本結果は単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、平坦路において後傾姿勢での走行試験を実施することで、本仮説の検証が可能であると考えられる。(3) 河床部での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にある。特に、足元の滑りへの対応や礫や斜面部におけるバランス回復性能の向上が課題である。

4. 結論及び今後の展望

(1) 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、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能となった。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、现阶段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。火山灰堆積厚10cmでの自動車走行試験で車両（二輪駆動）の登坂走行が困難となったこととの比較より、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、走行試験以降の開発により蹴り上げ高の改善についての開発が進められている。(2) 河床部での走行試験結果より、大礫堆砂地や不整地条件下での走行および姿勢回復が課題である。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復元をすることができれば、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一定の距離を走行することが可能と想定される。具体的には、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や、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AI開発が進められている。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でき、災害時の状況把握や平常時の施設点検への活用が可能となる。

5. おわりに

これまで山間部や砂丘斜面での四足歩行ロボットの走行試験の実施事例³⁾はあったが、火山灰堆積地（泥濁化状態を含む）や土石流発生後の河床における走行試験は初めての事例であった。今回の走行試験によって火山噴火緊急対応における四足歩行ロボットの活用可能性が、一定条件下で確認でき、今後の開発により更なる可能性が見込まれる。

謝辞: 末尾となりますが、走行試験場所を提供いただきました大隅河川国道事務所、及び走行試験の協力を頂きました株式会社 Highlanders の関係各位に、御礼申し上げます。

【引用文献】1)上條ら(2015)砂防学会研究発表会概要集, 2015, P2-093 2)国土交通省大隅河川国道事務所 (2025) 令和7年10月9日土石流調査情報(桜島)第10報 3)Franco Angeliniら(2023)IEEE Access, 2023

表-2 走行試験結果一覧

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

○：走行可、×：走行不能、—：実施不要と判断
▲：実施予定であったが、実施できなかったケース



図-5 河床部での走行状況

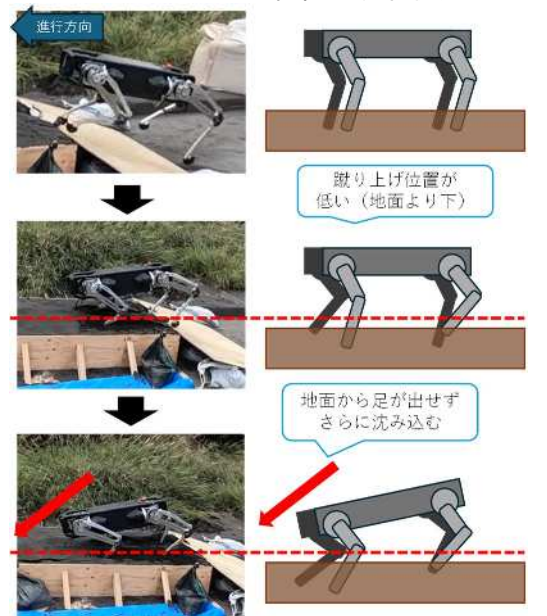


図-6 走行時の蹴り上げ高の模式図

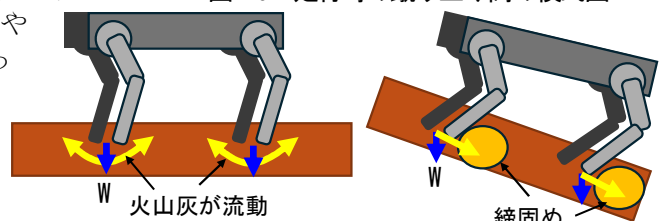


図-7 走行時の火山灰沈下状況の模式図