

# 火山斜面の転がりを利用した移動探査ロボットの開発

秋山 健 (東北大学), 多田隈 建二郎 (大阪大学),  
永谷 圭司 (東北大学), 吉田 和哉 (東北大学)

## Development of a Mobile Robot for Volcano Exploration using a Mechanism of Roll Downhill

Ken AKIYAMA (Tohoku Univ.), Kenjiro TADAKUMA (Osaka Univ.),  
Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

**Abstract :** When an active volcano erupts, a restricted area is set according to the eruption level. However, it is very important to observe inside of the area. Therefore, we proposed a tele-operated robotic observation system in active volcanoes instead of humans, and conducted some field experiments. During the experiments, sometimes, we observed that our mobile robot was rolled downhill unpredictably, and it was very difficult to traverse steep slopes. Generally, it was the problem to be avoided. However, in this research, we suggest a mobile robot that uses a mechanism of roll downhill as its locomotion, positively. In this paper, we explain a scenario of our robotic volcano observation system, and introduce the proposed robot.

### 1 緒言

世界でも有数の火山大国である日本には、110もの活火山が分布しており、このうち47の活火山が「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として選定されている [1]。これらの活火山が噴火すると、その規模に応じて定められた範囲への人の立ち入りが制限される。例えば、浅間山では、噴火警戒レベルが3に達すると、火口から4km以内への人の立ち入りが禁止される。その一方で、噴火の状況を確認することは、火山災害の予測や近隣住民の避難計画を策定する上で重要となる。

筆者らが所属する研究グループでは、活火山に移動ロボットを投入し、噴火状況の確認や山体斜面に堆積する噴出物の調査を行う「無人調査ロボットシステム」の実現を目指し、浅間山などの活火山にてフィールド試験を実施してきた [2-4]。Fig. 1は浅間山斜面を走行する間探査ロボットCLOVERである。

これまでに実施したフィールド試験では、登山道や山体斜面において、クローラ型や車輪型の移動ロボットの走行試験を行ってきたが、ロボットが走行中に斜面下方向に転倒し、斜面を転がり落ちる問題があった。ロボットが転倒すると、操縦者の意図した地点に移動させることができなくなるだけでなく、最悪の場合、ロボットが走行不能となる恐れがある。

そこで本研究では、この斜面の転がりを積極的に利用し、効率的な探査を行う移動ロボットを開発することとした。本稿では、移動ロボットによる活火山監視のシナリオについて述べた後、提案する移動ロボットについて説明する。

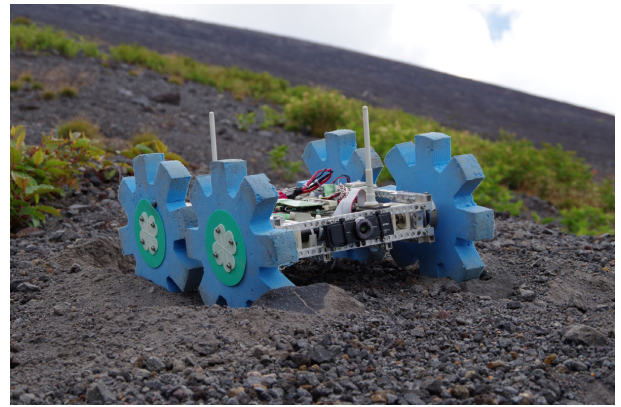


Fig. 1: A photo of CLOVER traversing Mt. Asama

### 2 移動ロボットによる活火山監視

活火山が噴火すると、その規模に応じて立ち入りが禁止される範囲が設定される。このとき、移動ロボットを活火山に投入し、立入禁止区域である山体斜面に堆積する噴出物の調査を行うことを目標とする。このシナリオのイメージをFig. 2に示す。

Fig. 2に示すように、移動ロボットはヘリコプタによって活火山へと運搬される。対象とする火山地域は標高が1000mを超えるため、燃焼空気の濃度の問題からレシプロエンジンを搭載した無人ヘリコプタの利用は難しい。そこで、本研究では、電動モータによって回転するロータを複数搭載した電動マルチロータ機をロボットの運搬に用いることとした。Fig. 3は、活火山探査移動ロボットCLOVERが電動マルチロータ機によって運搬される様子である。ただし、電動マルチロータ機のペイロードは、それほど大きくないため、搭載する移動ロボットは小型軽量であること

が望ましい．なお，CLOVERの重量は2.5kg程度である．

移動ロボットは，電動マルチコプタによって運搬された後，山体斜面に投下され，斜面を下りながら堆積する噴出物の調査を行う．移動ロボットが走行する環境をFig. 4に示す．ここは，浅間山の標高2100m付近，北東側斜面であるが，噴出物で覆われた軟弱土壌，火山礫が散在する不整地，斜度が30度を超える急斜面という移動ロボットにとって非常にチャレンジングな環境である．2012年9月に実施したフィールド試験では，小型の移動ロボットが斜面で転倒して走行継続不能な状況に陥った [5]．また，CLOVERは転倒しても走行が継続可能な構造であるが [6]，2013年8月に実施したフィールド試験では，CLOVERが走行中に転倒し，そのまま斜面を50mほど転がり落ちる現象が見られた．このとき，操縦者はロボットから3km程度離れた遠隔地から，ロボットに搭載したカメラ映像とGPS座標を頼りに操作を行っていたが，ロボットの転倒の危険性を把握することはできなかった．

以上より，移動ロボットによる活火山監視には，以下の技術課題があげられる．

#### 移動性能

ロボットは噴出物で覆われた軟弱土壌，火山礫が散在する不整地，斜度が30度を超える急斜面での高い走破性能が求められる．

#### 長距離通信

ロボットの操作は，活火山の立ち入り禁止区域外から行うため，基地局・ロボット間の通信技術が必要となる．

#### 遠隔操作

ロボットの転倒が発生しやすい環境にて，周囲の環境情報をどのように取得し，操縦者の負担を軽減させるかが課題となる．

#### 噴出物調査

ロボットには山体斜面において，噴出物の堆積量や種類，浸透能の調査が求められる．

本研究では，上記の課題のうち，移動性能にフォーカスを当てて，ロボットの開発を進めることとする．

### 3 斜面転がり型移動ロボットの開発

ロボットが走行する環境は，Fig. 4に示すような軟弱急斜面であり，前節で述べたようにロボットが斜面下方向に転がり落ちる現象が見られた．また，斜面に散在する火山礫に加速度を与えると，斜面を転がり始め，麓まで勢いを失わずに転がり落ちた．従来の移動ロボットにとって転倒や斜面での転がりは，探査を進める上での妨げとしかならなかったが，今回開発を目指すロボットは，この転がり現象を積極的に利用する．



Fig. 2: A scenario of volcano observation



Fig. 3: A volcano exploration UGV “CLOVER” and a multi-rotor UAV “ZionPro800”



Fig. 4: A slope of Mt. Asama

Fig. 5に斜面転がり型移動ロボットのCAD図を示す．ロボットは円筒形をしており，左右にスポークが取り付けられている．このスポークは，本体と回転関節で接続されており，放射状に展開し，自由端側を直径として，斜面を転

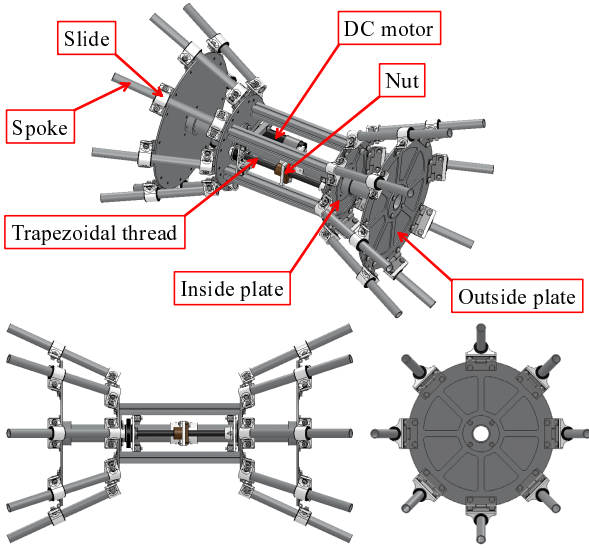


Fig. 5: 3D models of a roll down robot

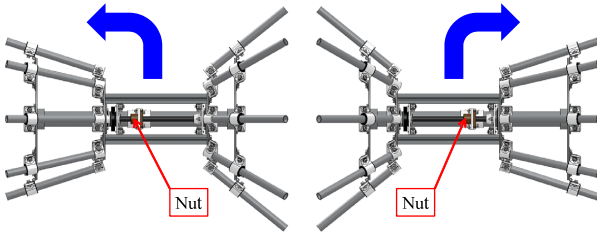


Fig. 6: A steering mechanism of a roll down robot

ることができる．また，本体内部の台形ねじがDCモータによって回転することにより，ナットが左右に移動する．このナットの動作と同期して，ロボットの外側のプレートも左右に運動する．外側のプレートとスポークとはスライドを介して接続されているため，内側のプレートと外側のプレートの距離が変化することにより，スポーク先端の直径が変化し，ロボットは任意の方向に進行方向を変化させることが可能となる（Fig. 6）．

Fig. 7に示すように，左右のスポーク先端直径をそれぞれ $D_L$ ， $D_R$ ，ロボットの回転速度を $\dot{\phi}$ とすると，ロボットの転がる並進速度 $v$ は，

$$v = \frac{1}{4}(D_R + D_L)\dot{\phi} \quad (1)$$

となる．Fig. 7に示すように，スポーク長さを $l$ ，左右のスポークの開き角度をそれぞれ $\theta_L$ ， $\theta_R$ とすると，スポーク

Table 1: A specification of a roll down robot

$D_{R,Lmax}$	$T_{max}$	$s$	Weight	
400 mm	600 mm	-60 ~ 60 mm	5 kg	
$L$	$B$	$d_o$	$d_i$	$l$
400 mm	200 mm	260 mm	220 mm	200 mm

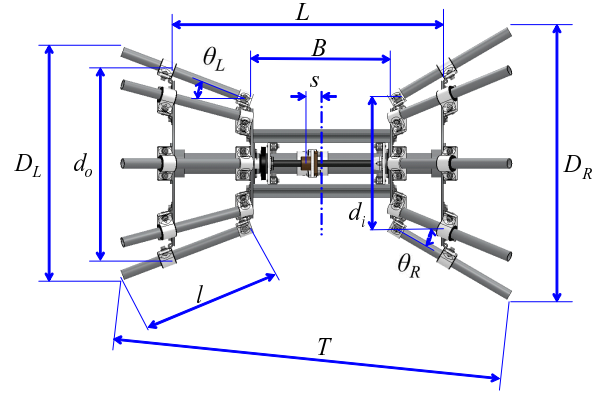


Fig. 7: A configuration of a roll down robot

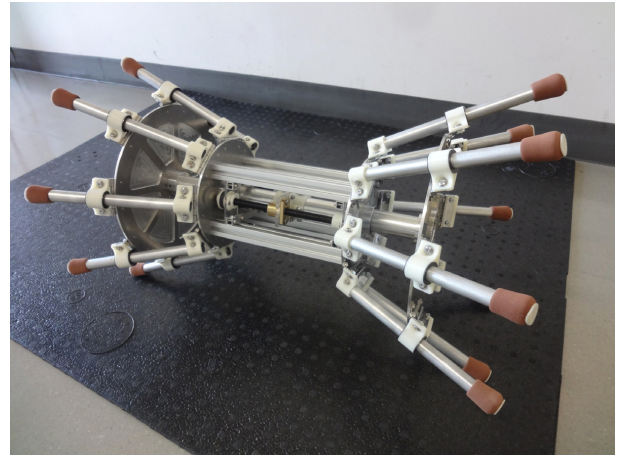


Fig. 8: An overview of a roll down robot

の先端直径は次式で示される．

$$D_{L,R} = d_i + 2l \sin \theta_{L,R} \quad (2)$$

ただし，

$$\theta_L = \arctan \frac{d_o - d_i}{L - B + 2s} \quad (3)$$

$$\theta_R = \arctan \frac{d_o - d_i}{L - B - 2s} \quad (4)$$

である．上式において， $d_o$ はスライドのピッチ円直径， $d_i$ はスポークを取り付けた部分の直径， $L$ は左右のスライド間距離， $B$ はスポークの取り付け距離， $s$ はナットの移動量である．

以上より，左右のスポーク先端の距離 $T$ は，次式で表される．

$$T = \left\{ \left\{ l(\cos \theta_R + \cos \theta_L) + B \right\}^2 + \left\{ l(\sin \theta_R - \sin \theta_L) \right\}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

よって，ロボットの旋回速度 $\omega$ は以下となる．

$$\omega = \frac{1}{2T}(D_R - D_L)\dot{\phi} \quad (6)$$

また、このときの巡回半径 $\rho$ は次式で表現される。

$$\rho = \frac{v}{\omega} = \frac{T}{2} \cdot \frac{D_R + D_L}{D_R - D_L} \quad (7)$$

開発した斜面転がり型移動ロボットの外観をFig. 8に、仕様をTable 1に示す。なお、Table 1中の記号は、Fig. 7のものとは一致する。

この斜面転がり型移動ロボットの特徴として、従来の移動機構と比較して低消費電力であるという点が挙げられる。例えば、Fig. 1のCLOVERは、車輪の駆動に11WのDCモータを2つ用いており、浅間山斜面でのフィールド試験では、30Whのバッテリーで2時間の動作が限界であった。一方、斜面転がり型移動ロボットの移動に関するアクチュエータは、進行方向を変化させるためのDCモータ1つである。さらに、斜面を下る際には、ロボット自身の位置エネルギーを利用するため、電力を消費する必要がない。したがって、斜面転がり型移動ロボットは、従来のロボットと比較して長時間の動作が可能となる。また、山体斜面を下りる速度は、従来の移動機構と比較して格段に速く、山体斜面において効率的な探査を行うことが可能と考える。

## 4 結言

本研究では、活火山探査を目的とした、斜面転がり型移動ロボットを開発した。このロボットは、従来の移動ロボットでは探査の妨げとなっていた、急斜面での転がり現象を積極的に利用することで、山体斜面の効率的な探査が期待できる。

今後、このロボットを用いて、火山環境でフィールド試験を行い、開発した移動機構の有用性を検証する予定である。さらに、このロボットを用いて、山体斜面を自律的に探査する手法、堆積物の調査を行う手法の開発を目指す。

## 参考文献

- [1] 気象庁 火山噴火予知連絡会、中長期的な噴火の可能性の評価について、火山活動評価検討会、2009-06
- [2] 永谷圭司、木下宏晃、西村健志、小柳栄次、油田信一、久武経夫、森山裕二、小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—浅間山での走行試験—、第11回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 (SI2010) 論文集, pp.555-558 2010-12
- [3] 永谷圭司、桐林星河、西村健志、吉田智章、小柳栄次、羽田靖史、油田信一、中里邦子、久武経夫、森山裕二、小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—高出力の無線通信を用いた浅間山でのフィールド実験—、第12回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 (SI2011) 論文集, pp.54-57, 2011-12
- [4] 永谷圭司、西村健志、吉田智章、小柳栄次、羽田靖史、油田信一、多田隈建二郎、小型移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—浅間山における2012年フィールド試験—、第13回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 (SI2012) 論文集, pp.648-651 2012-12
- [5] 山内元貴、秋山健、高橋悠輔、永谷圭司、吉田和哉、羽田靖史、車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験、第13回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 (SI2012) 論文集, pp.652-654 2012-12

- [6] 秋山健、山内元貴、永谷圭司、吉田和哉、伊豆智幸、Randy Mackay、活火山探査を目的とした電動マルチロータ機搭載用小型軽量移動ロボットの開発、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2013)、1P1-P15 2013-05