^{特集「無人観測ロボット」} 火山観測用小型ロボット一火山観測用自走式 センサー「ほむら」の開発とフィールド試験報告

金子 克哉¹, 安部 祐一², 伊藤 公一³, 岩堀 功大⁴

(要旨)人が近づくことが危険な活動的火山の火口内で機動的に観測を行う小型ロボット,火山観測用自走 式センサー「ほむら」の開発・実用化を目指している.ほむら開発において,走行不能になりにくいこと, 製作・運用費を低くすることに重点をおき,上下対称形の車体をもつ,安価に製作できる試作機を完成させ た. 三宅島雄山と伊豆大島三原山の火山フィールドで走行を試験し,不整地でほむらが優れた移動能力を持 つことを確認し,改良点を明らかにした.今後,通信系の改良と火山観測のための専用センサーを開発し, ほむら実用化に向けた運用試験を行いたい.

1. はじめに

活動的火山において,噴火の予測や噴火ダイナミク スの理解をするためには,観測から噴火現象の推移の データを蓄積していく必要がある.より詳細なデータ を得るためには,火口近傍や火口内での諸現象のモニ タリングが重要である.現状では,火口近傍において は,静穏時に設置された火口カメラによる監視,地震, 空震,電磁気学的観測などの地球物理学的観測が行わ れている.一方で,刻々と推移する噴火現象を観測す るためには,臨機応変な観測が求められ,それを安全 に行うために無人ロボットによる観測システムの開発 が望まれる.

我々は、火口内を観測するための無人車両型ロボッ ト「火山観測用自走式センサー」の開発を目指している. 我々は、この「火山観測用自走式センサー」を「ほむら」 と名付けた.金子ほか(2010)[1]においてすでに述べ たとおり、我々は、ほむらを機動的かつ継続的に活動 的火山火口内を観測できるものとしたい.そのため、 火山フィールドを熟知する火山学者として、高度な口 ボティクス技術を追求するのではなく,火口内観測に 特化した現実的なロボットシステムを作ることを基本 姿勢とする.ほむらは、ロボティクスを専門とする工 学的研究分野に対して、火山観測するためのロボット のコンセプトを理学的分野から提案するものでもあ る.

現段階において, 我々は, ほむらの試作機を製作し, 火山フィールドでの試験を繰り返しながら, 実用化に 向けた改良を進めている.本報告では, ほむら以前の 火山観測用ロボットの開発プロジェクトをまとめ, そ れらの問題点を克服するためのほむら開発指針を示し, ほむら試作機の概要と火山フィールドで行われた試験 結果を報告する.

2. これまでの火山観測ロボット開発

これまで、火山活動モニタリングを目的とした無人 地上ロボットによる観測システムの開発がされてきた が、現在まで実用化されているものはない.このこと は、火山観測用ロボットの必要性が認識されつつも、 開発が困難であることを示している.その困難な点を 洗い出し、ほむら開発の参考とするため、我々は、こ れまで開発された火山観測用ロボット、Danteプロジ ェクトのDante と Dante II, ROBOVOLC, MOVEに

^{1.} 京都大学大学院人間·環境学研究科

^{2.} 京都大学大学院工学研究科

^{3.} 京都大学大学院理学研究科

^{4.} 京都大学理学部

katsuya@gaia.h.kyoto-u.ac.jp

ついて検討した.以下にその概要を述べる.

2.1 Danteプロジェクト

Carnegie Mellon UniversityとNASAでは、1980年 代半ばより、惑星探査に利用することを見据えて、過 酷な気象環境下で、岩塊が転がるような急斜面不整地 で活動できるロボットの開発プロジェクトをスタート した. このプロジェクトに参加したロボット工学者は、 8本足で歩行するロボットを開発し、1994年のプロジ エクト終了までに、高さ約4mのロボット、Danteお よびDante IIを開発した. これらのロボットは、火口 の縁より底まで降り、火口底において試料の採取およ び観測するように設計された. ロボットは、ケーブル とその巻き取り機を持ち、火口壁の急斜面を降りる際 には、一方のケーブル端を火口縁に固定し、ケーブル を繰り出して降下する。ケーブルは、ロボットを支え るだけでなく、電力供給線やデータ送受線も一体化し ており、電源や制御用メインコンピュータは、ロボッ トには搭載されていない、これらの2台のロボットは、 実際に活動中の火口底の観測に試験運用された.

まず1992年, Danteが開発され, 南極のErebus火 山において試験運用された[2]. 試験では, 活動火口 縁からケーブルで支えられながら降坂し, 230 m下の 火口底まで降り,火山ガスの採取などを予定していた. しかし, 南極という補給のままならない地にあって, 十分な調整ができない状態で試験が強行され,火口縁 から数m降りたところで, Danteを支えていたケーブ ルのトラブルによって, 通信が途絶し, 試験が中止さ れた.

その後、機体やケーブルを強化したDante IIが開発 された[3-5]. 1994年, Dante IIはアラスカのSpurr火 山火口で試験運用された. Dante IIは,自律走行と遠 隔操縦を併用する形で、5日以上にわたり火口の中を 行動した. 165 mの標高差のうちの4分の1をセンサ ーを頼りに,自律走行で下り,噴気孔のガス組成を測 定した. しかし,火口から脱出するため登坂している 際に転倒落下し,結局回収することはできなかった [5]. この運用は,過酷な環境下でデータ取得に成功し ていること,無人探査機の運用を経験できたという点 で,貴重な例である.しかし,プロジェクトの終了後, さらなる開発は行われていない.

2.2 ROBOVOLC

ROBOVOLCは、イタリアを中心としてEUにおけ るプロジェクトとして開発された高さ約2mの6輪タ イヤバギーのロボットである[6-8].マニュピレータ、 ガス採取機、小型分光計を備え、無線の遠隔操作で、 火口近傍の岩石とガス試料の採取、ガスのその場観測 をすることを目的としている、火口内に降りるように 設計されていない.

2002年および2003年にエトナ火山, ブルカノ火山 で試験運用された. その結果, 40 cm 程度の岩塊があ る不整地, 30 cm の溝状地形を通過でき, 優れた不整 地走行能力が確認された. また, 試料採取やガスのそ の場観測にも成功している[8]. しかしながら, 2003 年のプロジェクト終了後, 運用の報告がなされていな いのは残念である.

2.3 MOVE

Mobile observatory for volcanic eruption(MOVE) は、東北大学のグループを中心に開発された[9,10]. 製品化されている無線操縦パワーショベル(日立建機 MPX10)に改造を施して製作された、キャタピラで走 行する高さ約3mのロボットである. MOVEは、活 動中の火口近傍の「火砕流や噴石などからの直接的脅 威が予想されず、しかし人間が立ち入るには危険すぎ る場所」[9]まで観測機器を運び設置する. MOVEは、 カメラや観測システムなどを搭載しており、その場所 で映像をはじめとする各種センサーによるモニタリン グ(空振など)を目的としている.

MOVEは、見通しで2 km以上の通信が可能であり、 また、搭載カメラも高性能であるため、遠隔操縦性能 が高い、伊豆大島の試験では、遠隔操縦で、三原山の 登山道を走行し、裏砂漠と山頂火口縁の往復に成功し ている[9,10].また重機をベースにしているため、ペ イロードも900 kgと大きい、また、悪天候であって も運用に支障はない、不整地走行に関しては、斜度 26度までの一般登山道を走行できる、MOVEをコン トロールするためのシステムとアンテナをワンボック スカーに搭載した可動基地局車も開発され、運用性も 高い、MOVEは、目的地までの道路が整備されてい る火山では有効な火山観測が可能である、今後、実際 の火山活動時の活躍が期待される.



図1:ほむら試作機の写真.(a)俯瞰.(b)上面.(c)正面.(d)側面.

3. ほむらの開発の指針

これまで開発された火山観測用ロボットは,目的は 様々であるが,いずれも実際の観測を行っていない. この現実から,どのような形態のロボットが有用なの か,どのような利用法が有効なのか,試行錯誤の段階 にあるといえる.火山観測用ロボット開発において, 我々は,「火口縁から目視によって操縦され,火口底 まで降り,火口底で観測ができる移動体」を開発する ことを目標とした.

開発に当たり、これまでのプロジェクトでは、次の 3つの問題点があることを認識した。

- (1) 巨額な予算が必要な開発プロジェクトは、そのプロジェクトが終了すると開発が停止する.
- (2)火山フィールドはロボットが移動するだけでも過 酷な環境であり、ロボットは転倒する確率が高い.
- (3) 火口底に降りたロボットは、火口底から帰還が難しい.
 - この問題点を踏まえ,
- (i) 転倒・転覆により簡単に走行不能にならない,
- (ii)低コストで製作・運搬・運用できる,
- の2点をほむらの開発の指針とした.

高価な高性能ロボットの開発は、ロボティクスの進 歩のために、また、高度な観測のために重要である. しかし、そのようなロボット開発は、試行錯誤を十分 に行うことができず、プロジェクトの終了とともに、 開発が停止してしまう.低コストであることは、有用 性を求めて試行錯誤する場合特に重要である.

4. 火山観測用自走式センサー 「ほむら」の試作機

以上の指針のもと,我々は,簡単に走行不能になら ない小型車両型ロボットほむらを開発し,試作機を完 成させ[1],その後改良を行った.以下に,ほむらの 車体と操作系の構成を述べる.電源と制御コンピュー タ部分以外は,おおむね金子ほか(2010)[1]と同一で ある.

4.1 車体

ほむらの仕様を表1にまとめた. ほむらの車体(図 1)は、2 mm厚のアルミニウム板材とチャンネル材を 用いて製作された. 車体の大きさは、約780×560× 300 mmである(図2). 車体中央部は、無線通信用ア ンテナを露出させるため、空洞となっている. 図2に は、主な構成部品の大まかな位置も示してある. ほむ



図2:ほむらの寸法と主な構成部品の配置.

表1:ほむらの仕様.

Material body	2mm thick Aluminum
wheel	9mm thick Plywood
Dimensions	approx. 780×560×300 mm
Weight	approx. 10 kg
Velocity	approx. 2 km/hr
Travel time	3 hours on flat ground
Wireless communication	1.2 GHz half-duplex tranciever; data
	rate 14.3 kbps;
	distance > 2km; continual-use time
	30 hours
A/D converter	12 bit, sampling rate >10kHz
Power supply	2-cell Li-Po Battery (7.4V, 4Ah) ×6
	for motors
	2-cell Li-Po Battery (7.4V, 5.5Ah) ×1
	for others

らは、左右に3個、計6個のモータ(タミヤ製ギアード モータ 540K300、最大効率時トルク 48 kgcm、無負 荷回転数55 rpm)で走行する。各モータはそれぞれ独 立した6セットのバッテリで駆動される。バッテリの 1セットは2セルリチウムポリマー電池(7.4V, 4Ah) からなる。この構成で、平地において、最高時速約2 km、連続3時間の走行ができる。

車輪は, 直径約30 cmの5角形星型である(図1d). 9 mm厚のベニヤ板と3 mm厚のゴムシート(ゴムシー



図3: ほむらの構成ブロック図上は車体部分,下は基地局の操縦 装置.

トはモータシャフトに対する走行時の衝撃を和らげる. 詳しくは[1]参照)により製作された.車輪は,各側3 輪が金属チェーンにて動力的に連結されているため, いくつかの車輪が浮き上がった場合でも,そのモータ トルクを接地している車輪に伝え,高い不整地走行性 能をもつ.

ほむらの車体デザインの特徴は、アンテナなどの突 起物を持たない上下対称の形状をしていること、正常 姿勢にあるときに最も重心が低くなるように設計され ていることである(図1c).これは、ほむらが火口壁 の急坂の登降時に、車体の転覆・転倒によって走行で きなくなることを極力避けるためである.この車体形 状のため、ほむらは転覆して上下がさかさまになって も、車輪を逆回転すれば同じ方向に走行できる.また、 5角形星型の木製車輪も、ほむらの大きな特徴となっ ている.火山フィールドは起伏が大きく、時には段差 を踏破する必要がある.我々は、階段や起伏の多い野 外不整地で車輪のテストを繰り返し、不整地走行に適 した車輪形状を模索し、本車輪の開発に至った.木製 では、高温環境の火山で大丈夫かと心配になるが、木 材が燃えるような高温下では他の電子システムも機能



図4:火山フィールドでのほむらの走行軌跡.(a)2010年3月の三 宅島雄山.(b)伊豆大島三原山.D-Gは2010年11月の試験, H-Kは2011年10月の試験をそれぞれ示す.

を失うので,そのような状況になったら潔く諦めるし かないと考えている.

4.2 コントロールシステムおよび電子系

ほむらは、基地局とデジタル無線通信による双方向 コミュニケーションを行う.現在,Futaba製無線通 信モジュールFDJ-03TH010(1.2 GHz帯,データ転送 速度は14.3 kbps)を用いている.通信モジュールは, モータとは独立した制御系用バッテリ(2セルリチウ ムポリマー電池,7.4V,5.5 Ah)で動く.このバッテ リにより,約30時間の連続通信が可能である.見通 しがよければれば,2 km以上の離れた場所で通信で きる.

ほむら車体および基地局のシステムのブロック図を 図3に示す.ほむら車体には、メインコンピュータと してMicrochip製dsPIC33F256GP710,GPSとモータ を制御するサブコンピュータとして2個のワンチップ コンピュータ同社製PIC24FJ64GB002が搭載され、こ れらは制御系用バッテリで動作する.ほむら車体は、 基地局からの命令(走行およびセンサー類のデータ取 得の命令)を受け取り、また、その命令に応じてデー タを基地局へ送る. センサー類によるデータは、 dsPIC内臓の12bit ADコンバーターにより取得され、 無線モジュールを通して基地局に送信される. 少なく とも10 kHzのサンプリングが可能である.

基地局のシステムは、ほむら車体と同じ無線モジュ ール、一般的なパーソナルコンピュータ、操縦用ジョ イスティック(サンワ製JY-P70UR)よりなる(図3). 無線モジュールはシリアルポートで、ジョイスティッ クはUSBでパソコンと接続される.ほむらは、専用 に開発されたプログラムにより操縦される.

4.3 センサー類

用いる AD コンバーターの仕様により,接続できる センサーの出力は、0V から設定したフルスケール電 圧(3.3 V以下)の間の正電圧である.また、ほむらは 小型で、ペイロードも小さいので、搭載するのはでき るだけ小型軽量のセンサーでなければならない.現段 階では、カメラ(LinkSprite 製 JPEG カラーカメラ(640 ×480))、温度計(10 k Ω サーミスタ)、放射温度計(石 塚電子製サーモパイル 10TP583T による) CO₂センサ (Sense Air 製 CO₂ EngineTM K30)、3軸加速度センサ ー(Kionix 製 KXM52)、電子コンパス(Geosensory 製 RDCM-802)、2個の GPS(ポジション製 GPS モジュー ル、転覆時にも使用可能なように車体の上下両面につ けられている)、オーディオマイクなどのセンサーを 搭載している.センサー類は制御用バッテリで動作す る.

4.4 製作・運搬・運用のコスト

ほむら車体部分の製作費は約8万円である.これに 約13万円の無線通信モジュールを搭載している.セ ンサーを除く車体の製作価格は,これまでのロボット に比べ,桁違いに低い.このため,運用で車体が失わ れたとしても,次の車体を短時間で容易に製作できる. また,ほむらと基地局システムは小型であり,これら の全てを1人で公共の交通機関を使用して運搬できる. 火山フィールドでも、2人で現実的な運用ができる.

5. 実際の火山フィールドでの試験結果

火山フィールドにおける走行試験は、2009年3月に



図5:火山フィールド試験におけるほむらの写真.背景地図データは、国土地理院の電子国土Webシステムから配信されたものである.(a)2010年3月の三宅島雄山.枯木の散在する斜面を登るほむら(図4aのA-B間).(b)2010年11月伊豆大島三原山の裏砂漠登山道(図4bのE-F間).(c)2011年10月伊豆大島三原山、スコリア急斜面(図4bのI付近).(d)2011年10月伊豆大島三原山の急崖降下試験で斜面を転げ落ちるほむら(図4bのJ-K間).

阿蘇火山中岳第一火口周辺で,2009年10月・2010年 11月・2011年10月に伊豆大島三原山裏砂漠で,2010 年3月に三宅島雄山南斜面で,それぞれ行われた. 2009年3月の阿蘇火山と2009年10月の伊豆大島にお ける試験の詳細は,[1]に報告されている.ここでは, それ以降の火山フィールド走行試験について簡単に報 告し,ほむらの能力についてまとめる.なお,2010年 の2つの試験は[1]の仕様のほむらで行われ,2011年 の試験は本論文で述べた仕様のほむらで行われた.仕 様の違いは,主として電源容量と電子制御系にあり, 走行能力そのものには大きな差異はない.

5.1 2010年3月三宅島雄山南斜面における試験

2010年以前では、火山礫と土壌からなる斜面(阿蘇 火山)やスコリア斜面(伊豆大島)の走行を試験した[1]. 本試験は、前述の2つとは異なる環境の火山斜面の走 行性能を調べることが目的である、三宅島雄山(図 4a)では、2000年噴火の火山ガス大量放出で、立ち枯 れた木とその折れた枯れ木が斜面を覆う(図5a). ほ むらは、雄山南斜面七島展望台(標高460 m)付近、図 4aの地点Aより出発して山頂を目指した.枯れ木が 転がる斜面を走るのは最初は難しく,何回か太い木に 乗り上げるなどして走行不能になった.しかし,やが て操縦のコツをつかみ,走行不能になることなく操縦 できるようになった.また,最大34度の斜面も踏破 した.地点Bでバッテリが切れ,充電を行った後,地 点Cまで走り,時間の都合によりそこで試験を終了し た.

5.2 2010年11月伊豆大島三原山裏砂漠におけ る試験

この試験では、実際の火山フィールドでなるべく長 く走行すること、また、実際の火山で山頂まで達する ことをテーマに試験をした.ほむらは、三原山山頂へ の登山道をD地点から出発した(図4b).地点Eまでは、 スコリアに覆われた緩やかな登り登山道であり、それ 以降、最大斜度30度程度のスコリアおよび火山礫に 覆われた登山道となる(図5b).ほむらは、問題なく 火口縁の外周道のF地点まで登り切った.F地点でバ ッテリが切れたので、そこで充電して再び出発した. この時は、時間の関係で半分以下の充電しかできなか った.火口縁から御神火茶屋に降りる登山道の途中, 地点Gで再びバッテリが切れ,そこで試験を終了した.

5.3 2011年10月伊豆大島三原山裏砂漠にお ける試験

ここでは、登山道外の火山斜面の走行と急岸の降下 試験を行った. ほむらは裏砂漠のH地点から出発し (図4b),三原山山頂を目指し、スコリア斜面をI地点 まで登った(図5c). I地点は最大斜度34度であったが、 ほむらは連続して登ることができた. I地点で一部の バッテリ切れにより一部のモータが動かなくなったが、 それに気づかずに走行を続けた結果.動いているモー タギアに過負荷がかかり、ギアが破壊した、時間の都 合で,ここでさらに上に行くことを断念し,少しだけ 充電して、H地点まで戻った. 今回の試験ルートでは、 山頂下で斜度が40度に達している。40度程度の別の スコリア斜面で試験してみた結果. 車輪トルクが十分 あるにもかかわらず、この角度になると、車輪が空回 り、スコリア斜面を崩すだけで、登ることはできなく なる、バッテリ切れとギアの破壊のため、山頂に達す ることをあきらめたが、これらのトラブルがなかった としても、山頂まで達することはできなかったと考え られる.

この試験ではさらに、火口縁より火口内に降下する ことを想定して、ほぼ垂直な崖を含む急崖を降りるこ とを試みた. ほむらは、図4bにおける地点Hより櫛 形山への緩やかなスコリア斜面を登り、地点」から高 さ約30mの崖を降りた、降り始めてすぐに、急斜面 のため、ほむらは崖を転がり落ち(図5d)、崖下のK 地点の径1m程度の溶岩岩塊に激突し、停止した、こ の衝撃によって、ほむら車体の右後部が変形し、前方 左車輪がモータの動力軸より外れ、後方左のチェーン 脱落防止板の一つが大きく変形した、この変形でチェ ーンと左側車輪が回らなくなった.一方、制御系や通 信系には異常が見られなかった.これは、衝撃吸収能 力の高い車輪がほむらの車体側面を覆っており、それ に保護されたためと考えられる. チェーン脱落防止板 の変形を直したところ、走行できるようになり、車輪 の一つが脱落した状態にもかかわらず、地点Hまで戻 ることができた.

5.4 ほむらの能力のまとめと実用化に向けた課題

今回の試験で、現実の火山フィールドを走行する場

合に、ほむらができることできないことが明らかになった、次に、ここで報告できなかった試験の結果を含めて、ほむらの能力をまとめ、改良点を述べる.

まず, ほむらの移動性能に関して述べる. ほむらの 車輪トルクは, 自分自身を垂直に持ち上げる強さを持 っている. 現段階で, 角度34度までの火山斜面を連 続的に登坂することができる. しかし, スコリアで覆 われているような崩れやすい斜面では, 斜度40度と なると, 登ることができない. 実際の運用時では, ル ートを吟味して, このような斜面を避けなければなら ない.

また, ほむらの上下対称の車体は, 火山フィールド を走行する際有効である. 試験中, ほむらは何度か転 覆したが, 車体設計の意図通り走行不能になることは なかった. 転覆による走行不能の心配がないため, 降 坂能力は極めて高い. さらに, 崖を転がり落ちて, 衝 撃を受けても電子制御系にはダメージがなく, 車輪ト ラブルはあったものの, 全く動けないという状態には ならなかった. このことは, 火口内観測の実現にとっ て, 心強い結果である. 今後車輪の衝撃に対する耐性 を高める必要がある.

また、ほむらは悪天候下でも運用可能である.2009 年の伊豆大島試験と2010年の三宅島試験では、時間 雨量が数mmの雨の中行われたが、ビニールテープに よる簡易な防水により、数時間以上問題なく運用でき た.以上のように移動性能に関しては、改良すべき点 があるものの、実用化できる段階にあると考える.

一方, ほむらと基地局間の通信については制約があ る. 見通しがよければ2 kmの通信が可能であるが, 岩などの障害物があると数100 mでも通信が途絶して しまう. 運用時に, 目視による操縦であっても, 岩陰 に入るなどして一時的に見えなくなることは十分に考 えられる. 地形障壁に強く, 通信速度が速い通信系を 採用し, 実際の運用に備えねばならない.

今後, 観測を含めた運用試験を行うために, ほむら に搭載する小型センサーを開発する必要がある. 至近 観測で有効なものは, ピンポイントの現象の映像観察, 噴気孔から噴出される火山ガスの温度, 成分の直接測 定(例えば[11]) などである. このため, CO₂および SO₂の小型ガスセンサーを試験中である.

6. 最後に

我々は、活動的火山の火口内で至近観測を行うため のロボット、火山観測用自走式センサー「ほむら」を 試作開発した.ほむら試作機は、火山フィールドにお いて簡単に走行不能にならず、低コストで製作・運用 可能であるという特徴を備え、約30度の登坂とそれ 以上の斜度の降坂能力を持っている.現段階で、車体 部分はすでに実用化できる段階に達しており、通信系 の改良と専用のセンサ開発を進めていき、ほむらを実 用化したい.

ほむらに採用されている上下対称低重心の車体は, 機器搭載のスペースを取りにくい欠点があるものの, 不整地でも移動できなくなりにくいという点で,車体 の上に機器を搭載しているロボットに比べ,格段に優 れている.火山観測以外の惑星探査などでも,例えば 映像取得などに特化して,急峻な地形の地域で活動す るのに有効ではないだろうか.ほむらの利用方法につ いて,惑星探査分野の方々からのご意見を歓迎したい.

ほむらの情報は, http://www.gaia.h. kyoto-u.ac. jp/`homura/にて公開されている.

謝 辞

ほむら開発にあたり、京都大学大学院人間・環境学 研究科の酒井敏博士には、車体設計やセンサー開発全 般に有益な助言をいただいた。ほむらの三宅島での試 験にあたっては、産業総合研究所の下司信夫博士と東 京大学地震研究所の市原美恵博士に協力していただき. ほむら改良等のため有益な助言をいただいた. 伊豆大 島における試験では、試験許可の申請などで、大阪大 学の佐伯和人博士にお世話になった. 査読者である白 尾元理氏には、論文原稿の文章の不備をご指摘いただ き、論文の修正に大変役立った、本研究は、文部科学 省科学研究費補助金(平成19~21年度基盤研究(B)探 査ロボットシステム構築のための MOVE 野外走行・ 観測実験、および平成23~25年度挑戦的萌芽研究携 帯電話網を使った火山観測機器のデータ通信コアシス テムの開発),東京大学地震研究所予知公募研究(平成 23年度活動的火山における火口近傍観測用自走式セ ンサー[ほむら]の開発)によりサポートされた.

参考文献

- [1] 金子克哉, 他, 2010, 火山 55, 109.
- [2] Wettergreen, D. et al., 1993, International Conference of Intelligent Autonomous Systems, 72.
- [3] Wettergreen, D. et al., 1995, Human Robot Interaction and Cooperative Robots 3, 274.
- [4] Apostolopoulos, D. and Bares, J., 1995, Human Robot Interaction and Cooperative Robots 3, 280.
- [5] Bares, J. E. and Wettergreen, D. S., 1999, Int. Jour. of Robotics Research 18, 621.
- [6] Guccione, S. et al., 2000, Proc. of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots, 777.
- [7] Muscato, G. et al., 2003, Industrial Robot 30(3), 231.
- [8] Caltabiano, D. and Muscato, G., 2005, in Cutting Edge Robotics, 499.
- [9] 谷口宏充, 他, 2009, ロボット 187, 10.
- [10] 後藤章夫, 他, 2012, 遊星人, 本号掲載.
- [11] Shinohara, H., 2005, Jour. Volcanol. Geothermal Res. 143, 319.