

火山観測用自走式センサー「ほむら」の開発

金子克哉*・伊藤公一**・安部祐一**

(2009年11月26日受付, 2010年3月26日受理)

Development of Mobile Sensor for Volcanic Observation “HOMURA”

Katsuya KANEKO*, Ko-ichi ITO** and Yu-ichi ANBE**

Monitoring of volcanic phenomena close to active volcanic vents and inside active craters is needed to predict change of volcanic activities and to understand dynamics of volcanic eruptions. In order to carry out safe volcanic monitoring, we have developed a prototype of a mobile sensor for volcanic observation “HOMURA”, which is a new robotic system that has been designed to observe volcanic phenomena inside active volcanic craters. HOMURA is a small unmanned ground vehicle (approx. 780×560×300 mm in dimension and 10 kg in weight) with six wheels driven by electric motors and it is operated by wireless remote control at a distance of more than 1 km. Data measured by some sensors in HOMURA are sent to the base station in real time. Materials of the vehicle body and wheels are aluminum with 2 mm thick and plywood with 9 mm thick, respectively. HOMURA can climb up and down a rough surface with slope angle of 30 degree. In addition, HOMURA does not readily become undrivable even in overturning during climbing because it has a unique body shape with a horizontal symmetry plane. HOMURA can be made and transported to mission fields at small costs. These allow us to make a new vehicle even if HOMURA should be lost by accident during missions and promptly to explore a sudden volcanic event by HOMURA. In test campaigns at Aso volcano and Izu-Oshima volcano, we confirmed that HOMURA has planned abilities on moving on rough surfaces and wireless communication.

Key words: robot, unmanned ground vehicle, monitoring, active vent, volcanic exploration

1. はじめに

活動的火山が噴火に至り終息するまでの諸現象の推移を明らかにし、噴火予測や噴火ダイナミクスの理解を行うためには、火口近傍さらには火口内における諸現象のモニタリングが必須である。現状では、火口近傍においては、火山活動の静穏時に設置された火口カメラによる監視、地震、空振、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。あらかじめ、活火山において上記のような十分な観測体制を持つことができれば、それは良いことであるが、全ての活火山に同様の観測体制を敷くことは現実的に難しい。また、ある程度のモニタリングが行われている火山においても、活動が活発化した場合、どのような現象が起こるかは予測困難であり、その

現象に応じた観測機器を設置しようとしても、すでに活発化している火口近傍に近づくことは非常に危険であり、行いたい観測ができない場合もある。

この現状を打破し、活動状態にある火山の刻々と変化する火口内およびごく近傍の機動的観測を安全に実現するためには、無人ロボットによる観測システムの開発が望まれる。陸上の火山の観測を行うためには、無人飛行体などを用いた空中観測と、火山地表を走り目的地に向かう不整地走行車による陸上観測の2つのアプローチがある。空中観測は、映像撮影や上空のガス採取などを効率的に行うことができるであろう。陸上観測は、目的地に達することができれば、そこでとどまり、長時間の連続的な観測をすることが可能である。

* 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田二本松町
京都大学大学院人間・環境学研究所
Graduate school of Human and Environmental Studies,
Kyoto University, Yoshida-nihonmatsu-cho, Sakyo-ku,
Kyoto 606-8501, Japan.

** 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町
京都大学理学部

Faculty of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-
oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan.

Corresponding author: Katsuya Kaneko
email : katsuya@gaia.h.kyoto-u.ac.jp
tel : +81-75-753-6874
fax : +81-75-753-6872

本研究では、陸上観測を行うための「火山観測用自走式センサー」の開発を行うことを目的とする。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。ほむらは、これまで誰もなしえなかった活動的火山火口内の機動的無人観測を継続的に実現するものでありたい。そのため、火山フィールドを熟知する火山学者として、高度なロ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り上げ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。

我々はほむらの開発に着手し、実際の火山火口において試験運用を可能とするプロトタイプを完成をみた。本論文では、このほむらのこれまでの無人ロボットにない新しいコンセプトを示し、そのシステムの概要、および火山フィールドで行われた試験結果について報告する。

2. これまでの火山観測用無人ロボットの開発

これまで、火山活動のモニタリングを目的とした無人ロボットによる観測システムの開発がいくつか試みられている。火山の空中観測では、YAMAHAの開発した自律飛行のできる無人ヘリコプタ R-MAX が、有珠 2000 年噴火において、有珠山周辺の立ち入り禁止区域の地形、地質状況の撮影を行った(佐藤, 2000)。近年では、安価な無人観測ツールとして、無線操縦の観測飛行機 SKY-1(佐伯・小島, 2009)も開発がすすめられている。

陸上を走行する火山観測用の無人ロボットとしては、以下に紹介する 3 つのロボットがこれまで開発された(例えば, Guccione *et al.*, 2000)。

(1) Dante II

Dante II は、NASA および Carnegie Mellon University で共同開発された多足歩行型の無人ロボットである(Apostolopoulos and Bares, 1995; Bares and Wettergreen, 1999; Wettergreen *et al.*, 1995)。本体は、約 3.7 m の高さである。火口内におり、火山ガスの採取およびその場分析を行うことを目的としている。

1994 年、Dante II はアラスカの Spurr 火山火口で試験運用が行われた。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(Bares and Wettergreen, 1999)。しかしながら、火口から脱出するため登坂している際に、安定を失い転倒落下し、結局回収することはできなかった。Dante II の Spurr 火山における探査は、過酷な環境下におけるデータの取得に成功し

ていること、および無人探査機それ自体の運用に対して経験を与えたという点で、貴重な成功例である。

(2) ROBOVOLC

ROBOVOLC は、イタリアで開発された 6 輪タイヤバギーで移動するロボットである(Caltabiano and Muscato, 2005; Muscato *et al.*, 2003)。マニピレーター、ガス採取機を備え、遠隔操作で、火口近傍の岩石、ガス試料の採取をすることを目的としている。火口内に降りることができるとなるとはなっていない。本体は約 1.8 m の高さである。

2002 年および 2003 年にエトナ火山、ブルカノ火山で ROBOVOLC の試験運用が行われた。その結果、40 cm 程度の岩塊がある不整地、30 cm の溝状地形も通過でき、優れた不整地走行能力が確認された。また、試料採取のテストにも成功している。しかしながら、2003 年に ROBOVOLC プロジェクトが終了した後、運用の報告がなされていないのは残念である。

(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(谷口ほか, 2009)。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、カメラや観測システムなどを搭載し、クローラーによる走行を行う高さ約 3 m のロボットである。MOVE は、「対象現象を望めるほど接近するにせよ、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」(谷口ほか, 2009)まで観測機器を運び設置する、また、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を行うことを目的としている。

これまで行われた試験では、見通しにおいては、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ことが実証された。また、重機をベースにしているため、ペイロードも 900 kg と大きく、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および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、運用性も高くなっている。MOVE は、目的地までのアプローチ道路が整備されている火山において有効な火山観測が可能であると考えられる。今後、実際の火山活動時の活躍が期待される。

3. 火山観測用自走式センサー「ほむら」

3-1 目標とコンセプト

我々は、ほむら開発において、「火口活動をしているが、人間が火口縁まで近づることができる火山火口にお

いて、火口縁から目視により操縦され、火口底まで降り、火口底で観測活動ができる移動体」を作ること为目标として設定した。この目的を達するため、前節で述べたこれまで開発された火山観測用無人ロボットの試験レポートを検討した。また、MOVEの運用試験に参加し、MOVEの長所・短所を検討した。これらを踏まえ、

- (i) 転倒・転覆により簡単に走行不能にならない
- (ii) 低コストの製作・運搬・運用

の2点をほむらの開発コンセプトとした。

(i)のコンセプトは、火山フィールドは単にロボットが走行するだけでも過酷な環境であり、ロボットの転倒・転覆が極めて高い確率で起こるとする認識のもとで設定された。実際、Dante IIは試験運用で転倒して走行不能になった。ROBOVOLCおよびMOVEは、背が比較的高く底面のみで移動機構をもつ形状であり、一旦転倒したら走行を再開することが極めて難しい。火口内観測のためのロボットは、転倒・転覆が起こらない、あるいは、起こっても走行不能状態にならない車体形状を持つ必要がある。もちろん、あらゆる状況で走行できるロボットを作るとは現実的に不可能であるが、極力走行不能状態にならない車体設計を行うことを開発の指針とした。

(ii)のコンセプトは、製作や運搬に高いコストが必要なロボットでは、試験や実際の運用を行うときに、その高コストが障害となっているという認識のもと設定された。これまで開発されたロボットは、高機能高性能であり、その製作には高いコストが必要である。このようなロボットは、ロボティクスの進歩のために、また、高度な観測を行うために重要である。その一方で、例えば、失われることを恐れ、実際の運用を想定した過酷な環境下での十分な試験がためられ、実際の運用時に生じる問題点を発見しにくい。また、仮に試験や運用で失われてしまった場合、次の車体を製作することが資金の問題から難しい場合が多いであろう（Dante IIは試験運用で失われてしまい、その後の開発が停止した）。また、先に述べた3つのロボットは、人力で運べるようなサイズ、重量ではなく、ロボットを火山フィールドまで運ぶための運搬の負担も大きい。様々な場所と時期に発生する火山活動に対し、迅速な観測対応を行う場合、この高い運搬コストは負の要因となる。

ほむら開発のコンセプトは、重要なことであるにも関わらず、これまでの火山観測ロボットではあまり陽に取り上げられることのなかった新しいコンセプトといえる。コンセプト(i)は、ほむらの車体形状により、コンセプト(ii)は、これまでのロボットに比べ大幅なコストダウンを行っていることにおいてそれぞれ実現されている（具体的内容は後述される）。

3-2 ほむらの機能

以上の目標とコンセプトのもと、我々は、簡単に走行不能にならない小型車両としてほむらを開発することにした。実際の火口で実戦的な試験運用が可能であるプロトタイプを開発するため、ほむらが備えるべき具体的な機能を以下のように定めた。

- (i) 火口壁を想定した急峻な不整地斜面の降坂が安定してできること。可能であれば火口から帰還するため、斜度30度程度の不整地登坂ができること。
- (ii) 搭載したセンサーによる取得データをリアルタイムで送信し、基地局で受信できること。
- (iii) 見通し1 km以上の無線コミュニケーションが行えること。

また、現段階では備えるべき機能としては設定していないが、将来における目視によらない遠隔操縦の可能性を探るため、ほむら本体に、カメラ、GPS、車体状態取得のためのセンサーを搭載し、操縦を行うことも試みる。以上の機能を実現したプロトタイプほむらの仕様を以下に述べる。

3-3 ほむらの仕様

(1) 車体

ほむらの仕様をTable 1にまとめた。ほむらの車体本体は、2 mm厚のアルミニウム板材およびチャンネル材を用いて製作された(Fig. 1)。車輪を除くサイズは、560×356×52 mm、車輪を含めたサイズは、約780×560×300 mmである(Fig. 2)。車体中央部は、無線通信用のダイポールアンテナを露出させるため、空洞となっている。

ほむらの車体デザインのこれまでのロボットにない大きな特徴として、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が挙げられる。

Table 1. Specification of HOMURA

Material	body	2mm thick Aluminum
	wheel	9mm thick Plywood
Dimensions		approx. 780 x 56 x 300 mm 560 x 356 x 52 mm (without the wheels)
Weight		approx. 10 kg
Velocity		approx. 2 km/hr
Travel time		1.5 hours
Wireless communication		1.2 GHz half-duplex transceiver; data rate 14.3 kbps; distance > 2km; continual-use time 15 hours
A/D converter		8ch 12 bit
	Sampling rate	Max. 10 kHz
Power supply		6-cell AA-NiMH battery (7.2V) x 8

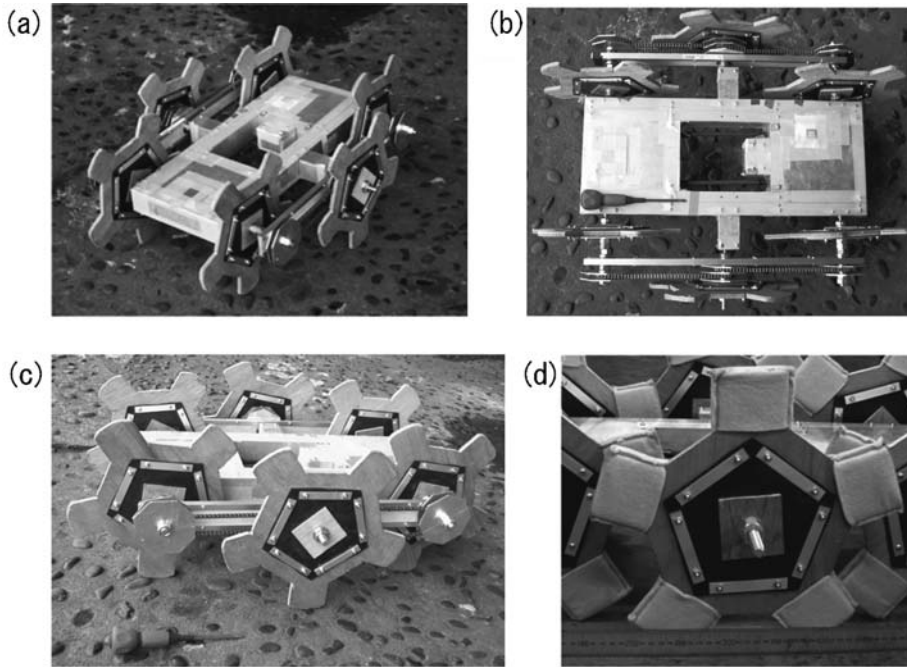


Fig. 1. Photographs of HOMURA in the test trial during the Observation Robot Symposium and Field Experiment in Izu-Oshima Volcano in September, 2009. (a) HOMURA vehicle. (b) Top view. (c) Side view. (d) A wheel.

る。これは、コンセプト (i) において述べたように、ほむらが目指す火口底観測時の火口壁の急坂の登降坂の際に、車体の転覆・転倒により走行不能状態に陥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たとしても、そのままの状態では車輪の回転を逆向きにすれば同じ方向に走行でき、簡単に走行不能になることはない。常に上を向いていなければならないGPSなどのセンサーは、あらかじめ車体の上下面にそれぞれ一つずつ設置されることにより、転覆した場合にも使用可能にできる。また、ほむらは、横倒しの姿勢が不安定であり、かつ横倒しになった時には車輪が地面に接することになる (Fig. 2)。したがって、横倒し状態になっても、車輪を動かしその状態のバランスを崩して走行可能な姿勢へと復元することができる。

Fig. 2 には、主な構成部品が車体内部における大まかな位置も合わせて示してある。ほむらは、片側に3つ、計6つのモーター (タミヤ製ギアードモーター 540K300, 最大効率時トルク 48 kg cm, 無負荷回転数 55 rpm) で走行する。各モーターはそれぞれ独立した6セットの駆動用バッテリーで駆動される。バッテリーの1セットは6セル単三型ニッケル水素電池 (7.2 V, 2200 mAh 以上) からな

る。この構成で、最高速度約 2 km/h, 合計 1.5 時間の走行が可能である。車体後部のスペースに、無線通信モジュールとコンピュータボード (説明は後述) が配置されている。それ以外のスペースは、配線材料およびセンサー類が収められている。

車輪は、直径約 30 cm の五角形星型の車輪である (Figs. 1d and 3)。9 mm 厚のベニヤ板および 3 mm 厚のゴムシートにより作成された。車輪は、中央の動力軸を固定する木材部と、外周の星型をしている木材部とに分かれている。両者の間は、車輪両側のゴムシートとそれを固定するアルミプレートとねじによって連結固定されている。これは、走行中に車輪外周部にかかる衝撃をできるだけ動力軸に伝えないようにするためである。この五角形星型の木製車輪も、他に見ることのできない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。ほむらの開発段階で階段や起伏の多い野外不整地斜面で車輪のテストを繰り返して、不整地走行に適した車輪形状を模索し、その結果、本車輪の開発に至った。車輪材料である木材は、価格、加工が容易、軽量、丈夫さを総合すると優れた材料である。一方、木製車輪は、高温環境の火山で大丈夫かと心配になるが、そもそも木材が燃えるような高温下では、

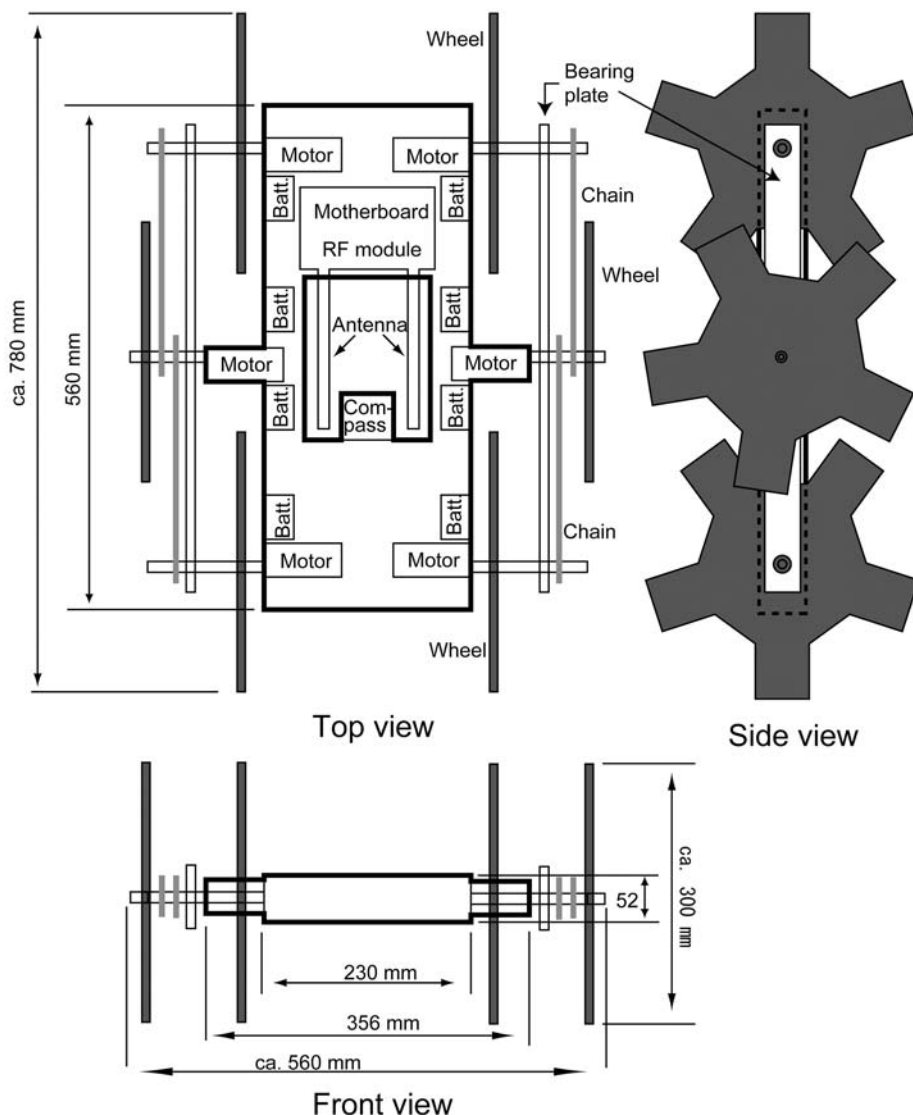


Fig. 2. Dimensions of HOMURA.

他の電子システムも機能を失うことは間違いなく、そのような状況になったら潔く諦めるしかないと考える。

車輪は、各側3輪が金属チェーンにて動力的に連結され同じ動きをし、他方の側とは独立に動く。チェーンにより動力軸がひばられて変形が生じるのを防ぐため、ベアリングをはめ込んだ板 (Fig. 2 の Bearing plate) を取り付けた。またチェーンが容易に外れないように、直径約 10 cm の 2 mm 厚アルミ板をチェーンプロケットを挟むように動力軸に取り付けた。チェーンによる動力連結がない場合、不整地走行において、地面が平らでないためいくつかの車輪が浮いてしまったとき、接地して

いる車輪だけでは、走行のためのトルクが不足して (特に登坂時) 走行が困難になる場合がある。この問題点を解消するために、チェーンによる車輪の動力連結を行った。その結果、車輪が浮いても、浮いた車輪に接続されたモーターのトルクが接地している車輪にも伝達されるため、登坂性能が良くなることが確認された。

(2) コントロールシステムおよび電子系

ほむらは、基地局と無線による双方向コミュニケーションを行う。無線通信には、ほむら車体と基地局両方で、Futaba 製無線通信モジュール FDJ-03TH010 (1.2 GHz 帯, 半二重デジタル通信, データ転送速度は 14.3

kbps) を使用しており、他とは独立した無線モジュール用バッテリー（モーターバッテリーと同種のもの）で動く。このバッテリーにより、約 15 時間の連続観測が可能であ

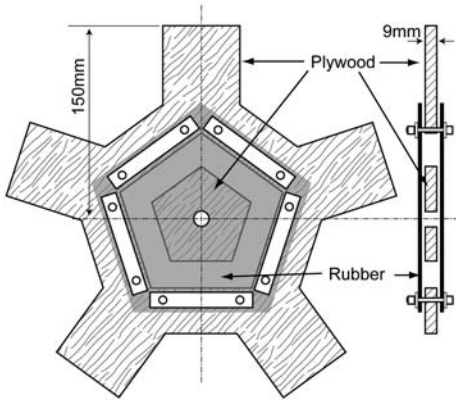


Fig. 3. Dimensions and structure of the wheel of HOMURA.

る。センサーデータのサンプリング間隔が長い場合、無線モジュールのスリープ機能により、さらに長時間の観測も行うことができる。全ての通信はこの一系統のみで行う。見通すことができれば、2 km 以上の離れた場所での通信が可能である。

ほむら本体および基地局のシステムのブロック図を Fig. 4 に示す。ほむら本体では、ワンチップコンピュータ (Microchip 社製 PIC18F2520, 以下では PIC と記す) が全ての制御を行っている。PIC は、独立した電子回路用バッテリー（モーターバッテリーと同種のもの）で動作する。PIC は、無線通信モジュールと接続され、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。走行は、PIC に接続されたモータードライバがモーターを駆動することにより行われる。モータードライバは、最大電流定格が 20 A 以上の低オン抵抗 FET の H ブリッジ回路により構成され、モーターに対して、正転、逆転、フリー（モーターに対し何ら力をかけない状態）、ブレー

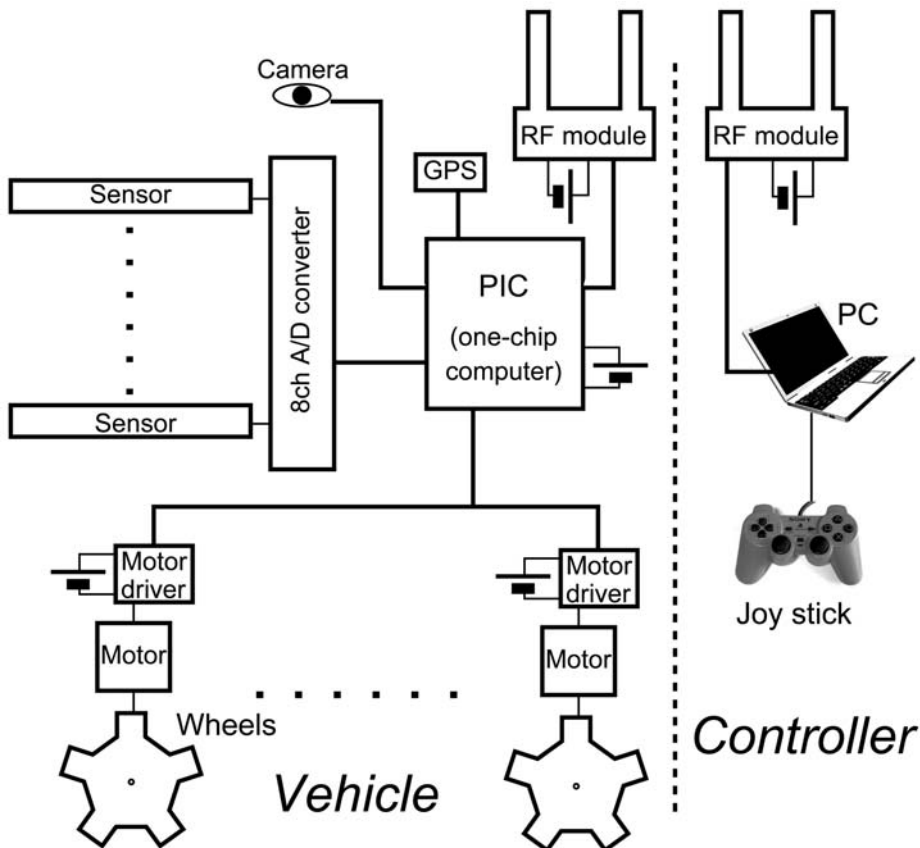


Fig. 4. Block diagram of HOMURA system.

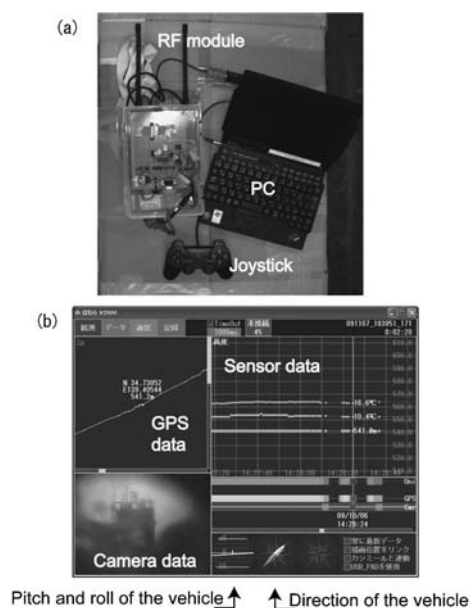


Fig. 5. The control system of HOMURA at the base station. The control system is composed of a wireless transceiver, a personal computer, and a joystick. (a) Photograph. (b) User interface design for operation and sensor data.

キ（モーターを回りにくくする）の4状態を指示する。モーターの回転は、PICからのPulse Width Modulation (PWM) 制御により速度調節が可能である。センサー類によるデータ取得は、PICに接続された8チャンネルの12bit A/Dコンバーター（Microchip社製MCP3208）により行われ、A/Dコンバーターに取得されたセンサーデータは、PICに送られ、すぐに無線モジュールを通して基地局に送信される。このシステムにおける最大のサンプリングレートは、約10kHzである。

基地局のシステムは、ほむら本体と同じ無線モジュールと、一般的なパーソナルコンピュータ、および操縦用のジョイスティック（Buffalo社製BGC-UCF1601）よりなる（Figs. 4 and 5a）。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。パソコン上で動作するほむらのコントロールプログラムを開発した（Fig. 5b）。

(3) センサー類

用いている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（5V以下）の間の正電圧である必要がある。また、ほむらは小型であり、ペイロードも大きくないので、できるだけ、小型軽量のセンサーを開発することが望まし

い。現段階では、データのリアルタイム取得とADコンバーターの試験のため、温度計（10kΩ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）、3軸加速度センサー（Kionix製KXM52）、電子コンパス（Geosensory製RDCM-802）、オーディオマイクなどのほむら専用センサーを開発し搭載した。

前述したように、目視によらない遠隔操縦の可能性を探るため、GPS（ポジション社製GPSモジュール）、カメラ（浅草ギ研製CMOSイメージセンサシリアルEYE、解像度160×120ドット、カラー）を搭載した。これらは、PICと直接接続されている。前述したセンサーのうち、3軸加速度センサーと電子コンパスは、ほむらの姿勢情報の取得（ほむら車体の傾きと向いている方向の検知）に使われる。以上のセンサー類は電子回路用バッテリーで動作する。

(4) 製作・運搬・運用のコスト

無線モジュールを除くほむら車体部分の製作費は約6万円である。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、20万円を下回っており、これまでのロボットに比べ、桁違いに低い製作費となっている。このため、試験や実際の運用で、車体が失われたとしても、車体が小型であることも合わせて、次の車体を短時間で容易に製作できる。また、ほむらおよび基地局システムは小型であり、これらの全てを1人で、かつ公共の交通機関を使用して運搬できる。火山フィールドでの運用においても、2人いれば現実的な運用が可能である。これらのことは、ほむらの運搬・運用を低コストで行うことができ、コンセプト(ii)を実現していることを示している。

4. 火山フィールドでの試験結果

4-1 2009年3月阿蘇火山中岳第一火口近傍

2009年3月上旬に、阿蘇火山中岳第一火口近傍西側で走行テストを行った（Fig. 6a）。ただし、このときの試験では、前述したチェーンによる車輪の動力連結は行っていない。この試験の目的は、目視による不整地走行の試験、センサーによるデータのリアルタイム取得の試験、無線通信距離の確認である。以下にその結果をまとめる。

走行試験において、阿蘇ロープウェー山頂駅付近を出発点とし、北に向かい、約10mの沢を降り、そして登り（Fig. 7a）、中岳第一火口の西側のリムに沿って（Fig. 7b）、阿蘇火山博物館により火口壁に設置されているAカメラ地点まで、往復500mを走行することができた（Fig. 6aのA-route）。土壌上に最大径30cmの火山礫が散在する不整地や、最大径30cmで大小様々の火山礫に覆われた不整地においては、傾斜の小さい斜面走行の場合、ま

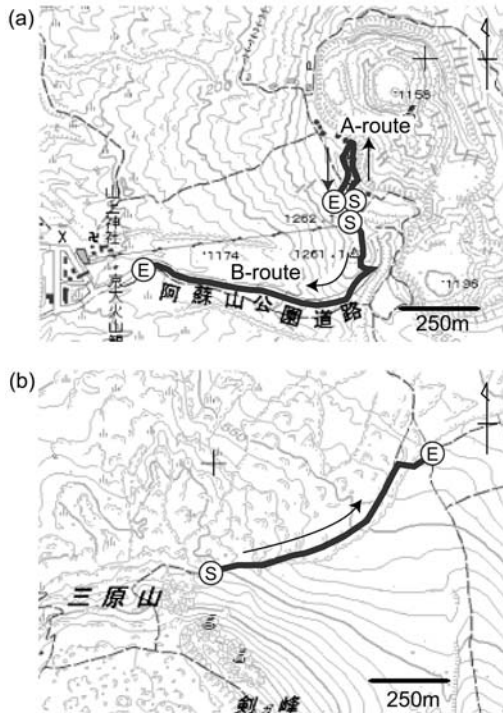


Fig. 6. Route maps of the test trials. S and E in the maps stand for start and end points of drive routes in the test trials. (a) The first crater of Nakadake, Aso volcano. (b) Urasabaku of Mihara-yama volcano, Izu-Oshima.

た、急斜面でも降坂を行う場合には、大きな礫による大きな段差を容易に避けることができ、走行に関して困難はなく、スムーズな移動が可能であった。一方で、同様の地表面状態の角度30度の不整地斜面登坂では、試行錯誤により様々な登坂ルートを試すことにより結果的に登ることができたものの、登坂ルートによっては、動くことができず、スムーズな登坂ができたとは言い難い。この困難の原因は、登坂時に不整地の起伏のため車輪が浮いた場合、接地している車輪だけでは、登坂するためのトルクが不足し、移動性能が大幅に低下するためである。このため、車輪トルクを増加することが必要と考え、本試験後に、前述のように、片側3輪ひと組のチェーンによる動力連結を行った。なお、ほむらは、この登坂時何度か車体が転倒転覆したが、そのことにより走行不能になることはなかった。さらに、阿蘇ロープウェー山頂駅付近を出発点として、道路わきの不整地および舗装された阿蘇山公園道路を有料料金所付近までの約1kmを時速約2kmで問題なく走行できた (Fig. 6a の B-route)。

無線通信に関しては、阿蘇山頂から火山博物館前まで

の見通しで3kmの距離が可能であることを確認した。一方で、数100m程度でも、物陰に入ると通信が不安定になることもある。使い方を注意する、または、基地局アンテナを高くするなどの対策が必要であることが分かった。

ほむら搭載カメラを用いて、目視することなく行う遠隔操縦を試みた。Fig. 6a の B-route における標高1261.1mの三角点付近の不整地において、操縦者とほむらの間の距離が約10mの状態、操縦者は、ほむら本体を見ずに、ほむらの搭載カメラから送られてくる画像を頼りに操縦を行った。その結果、遠隔操縦に必要な最低限度の解像度である白黒80×60ピクセルの解像度であっても、カメラ画像のワンショットの取得に5秒程度の時間が必要であり、ほむらが移動しながら操縦者がリアルタイムのカメラ画像を見ることができない状態ではない。したがって、現状のカメラシステムでは遠隔操縦は困難であるといわざるを得ない。この原因は、無線機の通信速度の遅さに起因するものである。遠隔操縦を可能にするためには、より速い通信速度の無線機を用いる、画像圧縮でデータ量を減らすなど、改良が必要である。

4-2 2009年10月伊豆大島三原山裏砂漠とその周辺

2009年10月伊豆大島にて、第一回無人観測ロボットシンポジウムが行われた。10月6日に、海のふるさと村および裏砂漠で実地の試験が行われた (Fig. 6b)。天候に恵まれず、十分に試験ができたとは言い難いが、逆にほむらのタフさを示すことができた。

まず、海のふるさと村付近の土壤斜面で登坂の試験を行った。30度程度の斜面は問題なく走破できた。さらに斜面が急になった時、3m以上転がりながら滑落し、着地時に車体上下が反転してしまったが、再び問題なく動くことができ、簡単に走行不能状態に陥らないことが実証された。

その後すぐ、バッテリー充電をすることなしに (バッテリー残量不明)、裏砂漠のスコリア斜面の走行テストを行った。雨 (大島町元町の大島特別地域気象観測所のデータで、1時間雨量が1~6mm) であったため、ほむら車体の隙間となっているところに、ビニールのテープを貼り、簡易な防水措置を施した (Fig. 1)。とりあえずの防水措置ではあったが、ほむらは、走行試験中およびその前後を含め、一時間以上雨にさらされたにも関わらず、全く問題が生じなかった。走行試験では、ほむらは、バッテリーが無くなるまで、裏砂漠のスコリア斜面を安定して、約800mの距離を時速約2kmで走行した (Fig. 7c, d)。この試験において、悪天候でも十分に稼働でき、不整地斜面での走行ができることが実証された。

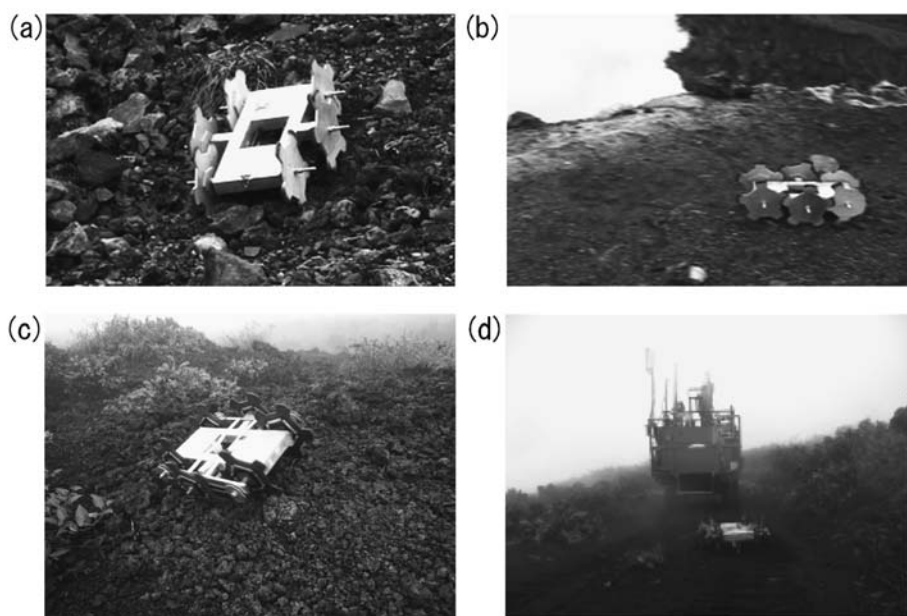


Fig. 7. Photographs of the test trials at volcanic fields. (a) HOMURA climbing up a rough-surface slope near Nakadake crater, Aso volcano. (b) At the rim of Nakadake crater. (c) HOMURA climbing up a slope covered with scoriae at Urasabaku of Mihara-yama volcano. (d) Following MOVE at Urasabaku. MOVE is a robot for volcanic observation developed by Tohoku University.

5. まとめと今後の開発方針

我々は、火山フィールドにおいて簡単に走行不能状態にならず、かつ、低コストで製作・運用可能な小型の車両型ロボット、火山観測用自走式センサー「ほむら」を開発し、活動的火山の火口内における現象の至近距離観測を目指す。このほむらが備えるべき能力として (i) 斜度 30 度程度の不整地登降坂、(ii) センサーデータの基地局へのリアルタイム送信、(iii) 1 km 以上離れた基地局との無線コミュニケーションを設定し、これらの能力を持つプロトタイプを完成させた。ほむらは、現実の火山火口内で試験運用を行うことのできる状態になっていると認識する。

一方で、現段階では、実際に観測を行うための搭載用小型センサーの開発が不十分である。遠隔観測では難しく、火山観測ロボットが至近で行う観測として意味があるのは、ピンポイントの現象の映像観察および噴気孔から噴出される火山ガスの温度、成分の直接測定 (Shinohara, 2005) などである。また、本論文では目標として設定しなかったが、搭載カメラおよびセンサーから送られてくるデータによる遠隔操縦を可能とする努力は引き続き行う。これを可能とするためには、通信速度がより速く、地形障壁に強い無線システムが必要である。日本の

火山山頂付近では、携帯電話が使える場所も多く (例えば、阿蘇、伊豆大島、雲仙など)、携帯電話システムを利用した無線通信も有効かもしれない。

我々は 2011 年度にほむらの運用を行えるようにすることを目標としている。2010 年度中に、実際の火山火口における試験運用を行う予定である。その結果により、走行能力や操縦性に対し必要に応じた改良を加えていく。また開発段階にある火口中の至近観測に有効なセンサー類のいくつかについてもこのとき同時に試験を行う計画である。

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、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。ほむらの阿蘇火山フィールドでの試験にあたっては、MOVE の運用試験と同時に行わせていただき、東北大学東北アジア研究センターの谷口充宏博士と後藤章夫博士、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、改良等のため有益な助言をいただいた。本論文の編集担当の筒井智樹博士、査読し

ていただいた橋本武志博士，佐伯和人博士には，本論文を修正する上で有益な助言をいただいた。本研究の一部には，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）を使用した。

引用文献

- Apostolopoulos, D. and Bares, J. (1995) Locomotion configuration of a robust rappelling robot. Proceedings of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95, Human Robot Interaction and Cooperative Robots, **3**, 280–284.
- Bares, J.E. and Wettergreen, D.S. (1999) Dante II: technical description, results and lessons learned. The international Journal of Robotics Research, 621–649.
- Caltabiano, D. and Muscato, G. (2005) A robotic system for volcano exploration. In *Cutting Edge Robotics* (Kordic, V., Lanzinica, A., and Merdan, M. eds.), 499–518. ARS/pIV, Germany.
- Guccione, S., Muscato, G., Nunnari, G., Virk, G.S., Azad, A.K.M., Semerano, A., Ghrissi, M., White, T. and Glazebrook, C. (2000) Robots for volcanos: the state of the art. Proceedings of the 3rd international conference on climbing and walking robots, 777–788.
- Muscato, G., Caltabiano, D., Guccione, S., Longo, D., Coltelli, M., Cristaldi, A., Pecora, E., Sacco, V., Sim, P., Virk, G.S., Briole, P., Semerano, A. and White, T. (2003) ROBOVOLC: a robot for volcano exploration result of first test campaign. *The Industrial Robot*, **30**, 3, 231–242.
- Shinohara, H. (2005) A new technique to estimate volcanic gas composition: plume measurements with a portable multi-sensor system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **143**, 319–333.
- 佐伯和人・小島知子 (2009) 無人観測機 SKY-1 の火山フィールドでの空中観測実験. 日本火山学会 2009 年度秋季大会講演予稿集, 77.
- 佐藤 彰 (2000) 自律飛行無人ヘリコプタによる有珠山火口付近の観測. ヤマハ発動機技報, **31**, 44–47.
- 谷口宏充, 後藤章夫, 市原美恵 (2009) 火山探査移動観測ステーション MOVE の開発. ロボット, **187**, 10–17.
- Wettergreen, D., Pangels, H. and Bares, J. (1995) Behaviour based gait execution for the DANTE II walking robot. Proceedings of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95, Human Robot Interaction and Cooperative Robots, **3**, 274–279.

(編集担当 筒井智樹)