# <sup>特集「無人観測ロボット その2」</sup> 長期連続観測が可能な火山観測ローバの 開発とフィールド試験

## 黒田 洋司<sup>1</sup>, 迎田 賢太郎<sup>2</sup>, 西川 佑樹<sup>2</sup>, 永田 祐也<sup>2</sup>, 高橋 佑弥<sup>2</sup>, 谷口 雅彦<sup>2</sup>, 井上 直人<sup>2</sup>

2012年6月4日受領, 2012年7月30日受理.

(要旨)火山の活動が活発化するとその規模によっては長期に亘って近傍調査が困難になる. 我々は, この 様な活発に活動する火山の近傍観測を実現するために, エネルギを自給し, 長期間連続して現場で移動調査 する能力を有する火山観測ローバ, Micro6 Volcanoを開発した. 火山地形において噴火の危険が迫る状況 を想定し, 伊豆大島三原山裏砂漠の中腹に約2週間に亘り展開した. この間, 遠隔による観測試験を実施し た. ローバは携帯電話回線を用いた通信機を持ち, 画像, 観測データ, 位置情報等の送信とそれに基づく遠 隔運用を, 現地から約100キロメートル離れた川崎市にある明治大学生田キャンパスより行い, 直線距離で 数百メートルの移動観測に成功した. また, 省電力モードによる夜間を越える運用にも成功した. 本論文で は, Micro6 Volcanoとフィールド試験結果の報告を行う.

## 1. はじめに

火山の噴火のメカニズムを理解することは、科学的 な見地から重要である.市民生活に対しても、1986 年の三原山や2000年の三宅島の噴火では全島避難を 強いるなど、周辺地域の住民の生活にも多大な影響を 及ぼす.また、2010年のアイスランドのエイヤフィ ヤトラ氷河で起こった大規模な噴火では、ヨーロッパ の約30カ国の空港を一時閉鎖に追い込むなど航空網 を大混乱に陥れた.このように大規模な火山活動は、 広範囲に大きな影響をもたらすため、詳細な調査が必 要になっている.しかし、噴火の前から現場で長期間 に亘って人力で調査をしたり、噴火以降は人が近づく ことは容易では無く、人に代わり火山を科学的に観測 することの出来るロボットの開発が求められている.

これまで、世界では様々な火山観測ロボットが開発 されてきた、米国航空宇宙局(NASA)とカーネギーメ ロン大学が共同開発したDante IIは火山や惑星探査 の地上試験機として開発された[1, 2]. Dante IIは, 6 脚の歩行型ロボットで,基本的にテザーにより外部か ら電力供給を受ける.レーザセンサおよび足と上部に 取り付けられた8個のカメラによって周辺の地形情報 を得ることができ,火山のガス濃度を検知するための ガスセンサを搭載していた.アラスカで5日間の実験 を行い,火山のガス濃度や地形のデータ取得などの実 績を挙げたが,現在は事故により失われている.

イタリアのカターニャにあるイタリア国立地球物理 学火山学研究所(INGV)では火山観測のためのロボッ トを数多く開発してきた[3]. 中でもRobovolcは6輪 の駆動機構を有し,高い走破性を備えている.また, GPS,コンパス,エンコーダによる自己位置推定やレ ーザセンサ,カメラを使ったマッピングによるナビゲ ーションシステムも開発され,その性能は実験により 実証されている[4].しかしRobovolcは重量が350kg あり,搭載した鉛蓄電池からの供給のみで活動するた め,連続稼働時間は約2時間と短い.

以上のようにこれまで開発されてきた火山観測ロボ ットでは,長期間連続して遠隔での活動が可能なロボ ットは存在しない.一方,人間が立ち入れない環境で

<sup>1.</sup> 明治大学理工学部機械工学科 2. 明治大学大学院理工学研究科(研究時) ykuroda@isc.meiji.ac.jp

長期間活動するロボットの例として,宇宙用の惑星探 査ローバ(Rover = 慣例的に惑星表面を移動する車両 型宇宙機の総称として用いられる)がある.無人の惑 星探査ローバは,旧ソヴィエト連邦が月で,米国が火 星で,それぞれ地表での踏破実験を成功させている. その中でも,Mars Exploration Rover(MER)は2004 年に火星表面に2機が着陸してから5年以上もの間, エネルギを背面に搭載した太陽電池によって自己給電 し,火星表面上において無人で探査を続け,火星表面 の詳細な写真や火星土壌の分析結果など,多くの科学 的発見をもたらした[5].

筆者らは、惑星探査ローバの研究を行っており、そ れらの技術を地上応用することで、長期間に亘る遠隔 運用が可能な火山観測日のローバを造ることを試みた. 本論文では火山観測ローバ Micro6 Volcanoの開発と 伊豆大島三原山裏砂漠における初期運用試験について 述べる、尚、節構成は以下の通り、2節では複数のロ ーバを用いた火山観測システムの提案、3節は火山観 測ローバMicro6 Volcanoのハードウェアについて、4 節はローバを動かす為のソフトウェア技術についてそ れぞれ述べる、5節では伊豆大島三原山で行ったフィ ールド試験について、結果を示した上で今後の展望を 述べる.

## 2. ローバ援用による火山観測システム

噴火前後および活動中の火山において,接近観測を ローバで行う場合,問題となるのは活動のためのエネ ルギ補給である.筆者らは,惑星探査機の技術を応用 して,エネルギを自己補給し,すべてのオペレーショ ンを遠隔で行うローバによる火山観測システムを構想 した(図1).ローバはエネルギを自己補給し,日を越 えて活動し続ける.この能力により,噴火が疑われる 対象地域にローバを設置した後,人間は安全な地域ま で退避することができる.その後は通信による遠隔制 御によってのみオペレーションを行う.

システム設計上の想定として,危険な現場に残るの はロボットのみであり,従って,ロボットの位置,方 位,傾斜はもちろん,ロボット自体の健康状態,周辺 の地形,局部的な気象,噴火の進捗状況等,オペレー ションに必要となる現場の状況のすべてはローバに搭 載されたセンサによってのみ得られると仮定し,この



図1:ローバ援用による火山観測システムの概念図.携帯電話回線によりローバが自律的にインターネットに接続する.携帯電話回線が届かない場所へは他のローバが中継することでカバーする.

条件で稼働可能なシステムとする.これは非常に厳し い条件設定だが、この様な厳しい条件を設定すること で、想定を越える激しい事象が発生した時でも運用で きる可能性が高まる.

また,広大な山岳地帯を,取得エネルギの小さい(従 って走行速度の遅い)ローバ1台でカバーすることは 本質的に無理がある.本観測システムでは,複数のロ ーバを現地に展開することを考え,運用のための通信 系と遠隔操縦系を構築する.

## 3. 火山観測ローバ Micro6 Volcano

Micro6は元来,宇宙航空研究開発機構(JAXA),中 央大学と共同で1997年頃から開始された月・惑星表 面を移動探査するローバの研究開発プロジェクト Micro5に端を発している[6]. 幾つかの試験モデル製 作を経て,より高度な研究開発を行うための地上試験 機としてMicro6を開発した[7]. 車体サイズは以下に 示す様に既にマイクロローバの範疇にはないが,後継 プロジェクトとしての名称を引き継いだため,Micro6 を車体シリーズ名として使用している.また,今回さ らに「地球以外の惑星探査機の地上試験モデル」では なく「地球という惑星向けの探査機」と発想を転換し, この考えに基づき地上での実用性を追求して多くの改 装を施し,新たにMicro6 Volcano(図2)として再構成 した.

#### 3.1 Micro6のシャシーとモビリティメカニズム

Micro6 Volcanoは、全長×全幅×全高=1.3×1.1 ×1.5 mの大きさで重量は約60 kgである.厳しい不 整地形を走ることを念頭に、アルミモノコックボディ の左右にディファレンシャル機構経由でロッカー機構 を取り付け、そのロッカーアームの先端にステアリン グ機構付きのインホイールモータを取り付けることに よって大きな起伏にも対応出来るようにした(図3). 車輪は金属材料でありながらゴムタイヤのような柔軟 性をもつ、金属ブラシを表面に有する車輪を採用した. 金属ブラシの車輪は元々ゴムが使用できない宇宙での 利用を考えて開発したものであるが、地上でもオイル に濡れた路面や地熱で熱くなった地面など、ゴムタイ ヤが苦手な場所での利用が考えられる.

Micro6 Volcanoではさらに,不整地走破能力を増 強させるため,HEXUS[7]の搭載も考えられている. これは4輪にさらに補助輪として2輪を追加した6輪 のメカニズムで,走破性や割れ目での転落防止など, 安全性を飛躍的に高めることを狙ったサスペンション システムである.

#### 3.2 電力管理および制御システムの構成

ローバはひとたび対象地域に投入されると,自力で 生存し続けられなければならない.従ってローバを成 立させる鍵の一つは,エネルギーの補給機能である.

図3: Micro6のモビリティメカニズム. 左右のロッカーアームが ディファレンシャル機構経由でボディに取り付けられてい るため、ボディのピッチング角は常に左右の地面傾斜角の 中央に保たれる.中央にある小型の2輪はHEXUSサスペ ンションシステム[7]である. 補給と言っても、エネルギが足らなくなった時点で山 を下りてエネルギを補給するのでは効率が悪い.ここ では多くの宇宙機と同様に、搭載した太陽電池により 電力を自給するシステムとした.

図4にMicro6 Volcanoの電力管理システムを示す. センサマストの影対策として,太陽電池は7並列とし, 最大電力点追従回路(MPPT)を経て電力バスに接続す る.また,一個あたり約100 WhのLi-Ionバッテリを 3台,それぞれ充放電制御回路経由で電力バスに接続 して安定化する.これにより,電源バスはノミナル 148 V,太陽光入射時最大19 Vとなっている.

ー日24時間のサイクル中,仮に晴天であったとし ても、少なくとも16時間以上の間太陽電池による発 電は望めない.これはわずか3W程度の電力消費で も夜間に50Whもの電力量を消費してしまうことを 意味する.従って電力の管理はローバの生存に関わる 重大な問題である.Micro6Volcanoでは表1に示す様 に4つの電力モードを持つ.走行時はすべてのサブシ ステムが起動されているが、定点観測モード時には画 像とナビゲーション・プロセッサまで、気象観測モー ドではシステムコントローラと通信機のみ電源が入れ られている.さらに夜間(省電力)モードでは通信機を 含めて電源を切り、約2.3W程度まで電力消費を押さ えている.

Micro6 Volcanoの制御システムの構成を図5に示す. 自己位置推定, ステレオ画像処理, 地図生成, 地形評



図4: Micro6の電力管理システム、最大電力点追従回路に接続された7並列の太陽電池(SAP)、3並列のリチウムイオン電池(BATT)と充放電制御回路(BCCU)のセットで作られたバス電源は、配電コントローラ(PDU)でサブシステム毎の供給制御を行う、配電コントローラはまた、太陽電池や各サブシステムの主要なポイントの電圧電流およびバッテリ残量の監視も行っている.

表1: Micro6 Volcanoの電力モードと消費電力. 夜間はスリープ モードになるが、1時間のうち6分間は気象観測データを送 信するため平均消費電力は下表のSleepよりも若干増える.

Module / Power Consumption [W]		Run	Stationary	Weather Monitor	Sleep
IMU	2.4	~			
DGPS	2.0	~			
Mobility	8.2	~			
Stereo Camera	4.7	~	~		
Navigation Processor	8.0	~	~		
Ethernet Hub	2.1	~	~	~	
Communicator	3.8	~	~	~	
System Controller	2.3	~	~	~	V
Average Consumption	33.5	33.5	20.9	8.2	2.3



図5: Micro6 Volcanoの制御システム構成. 多数の制御システム がEthernetによってネットワーク化されている. Ethernet を用いるのは安易な構成で,初期開発はやりやすいが,電 力消費が大きいのが今後の課題である.

価、パスプランニング等の高度な計算処理、および画 像圧縮と通信等はナビゲーションプロセッサが担って いる、ナビゲーションプロセッサには計算能力と消費 電力とのバランスを考えて、Intelの低消費電力プロ セッサであるAtom[8]を用い、消費電力をピークで 8W以下に抑えている、OSにはUbuntu Linux[9]、ミ ドルウェアにはROS[10]を用いている、電力制御、ロ ーレベルの通信およびヘルスモニタリングを行うシス テムコントローラと配電コントローラ(PDU: Power Distribution Unit)にはARM系の組込プロセッサ[11] を用い、これらの間は車載システムで用いられる、 ISO標準のシリアルバス規格であるCAN(Controller Area Network)によって接続している、また、ドライ

ブモータとステアリングの制御にはSH系のプロセッサ [12] を用いている.この様に様々な種類のシステムが混在しているのは、適材適所に選んだというより

は、過去に実績のあるものを組み合わせた結果であり、 今後の簡素化と最適化が課題である。

### 4. 誘導制御手法

Micro6 Volcanoの運用では、その多くは遠隔での マニュアル制御によってなされている.ユーザ(火山 研究者や防災関係者など)が見たいものに近づき、観 測するためには、遠隔でのインタラクティビティが必 須である.その一方で、長距離を安全に移動するため には、搭載センサによる地形解析とそれに基づく自律 制御が有効である.また、山岳地帯では通信が不安定 であることも多く、途切れる事も想定しなければなら ないことを考えると自律機能は必須であろう.以下に Micro6 Volcanoで用いている誘導制御手法について 述べる.

#### 4.1 自己位置推定

ローバの位置は科学的な面と移動制御の両面から高 い精度が必要である.火山地帯では、人工物はもとよ り立木も少なく、衛星からの電波が遮られる可能性が 少ないため、比較的高いGPS精度が期待できる.し かしながら、差分情報が通信によって得られなければ 数メートル~数十メートルの誤差が出てしまい、移動 制御に問題を引き起こす可能性がある.

ここではローバの位置をDGPS<sup>3</sup>, IMU<sup>4</sup>による傾斜 角および角速度,ステレオカメラによるビジュアルオ ドメトリ(VO)<sup>5</sup>,車輪のオドメトリ<sup>6</sup>を非線形デジタ ルフィルタ(UKF)<sup>7</sup>によって統合し,高精度かつ安定 して推定する手法を用いている[13, 14].また同時に 車輪のスリップ率も推定することによって高精度な走 行制御が可能な手法を開発,採用している.すべての 計算は3次元,6自由度で行っており,水平方向のみ ならず高さ方向の位置推定も高精度化している.図6

- 3.基地局から差分情報を通信で得て精度を上げる高精度GPSの 手法のひとつ.国内の基地局は海上保安庁が設置している.
- 4.慣性計測ユニットのこと.加速度センサ、角速度計および積 分器で構成されている.
- 5.カメラで捉えた複数の静止物体を画像上で追跡することに よってカメラ(車体)の移動量を推定する手法.
- 6.車輪の回転数から移動距離を推定する手法、通常は車輪のすべり(スリップ)を想定しないが、ここでは位置と同時に推定している。
- 7.ヤコビアンを使わずにランダムサンプリングによって行うタ イプの非線形フィルタの一つ.



図2:火山観測ローバ Micro6 Volcano. ワイヤブラシ製の車輪 を4個備えた4輪駆動4輪ステア方式の駆動システムを持つ. 上面に太陽電池,マスト上には気象観測器,GPS,ステレ オナビゲーションカメラ,通信アンテナ等を備え,ボディ 下面には地面の状態を監視するカメラも搭載している.



図6:6自由度自己位置推定の結果、起伏に富み、滑りやすい環 境でMicro6 Volcanoを走行させた結果、一周して、出発 点に近いほど精度がよい事を示している、ステレオビジュ アルオドメトリ、IMUとホイールオドメトリの情報を非線 形デジタルフィルタの一つであるUKF(Unscented Kalman Filter)の拡張版[13][14]により統合した結果、すべての計 算を6自由度で行い、高さ方向の位置及びスリップ率推定 も同時に行っている、この計算ではGPSは利用していない、



図7:遠隔オペレーションインタフェースの一部.図中、①ステ レオカメラとボディ下部の映像.②電力モードスイッチ、 ③走行制御パネル、④ステレオ3次元復元に基づく踏破性 評価マップ、⑤現在座標のプロット、⑥各部の電圧電流値、 バッテリ残量、姿勢角等ヘルスモニタリングデータ.これ らのデータは携帯電話回線を通じてローバから約3秒に1回 の割合で送信されてくる.



図8:ステレオ画像処理による高さ地図.車体の傾斜角も加味し て評価しているので、ローバ本体が傾いていても正しい評 価が可能である.



図9: 踏破性解析地図とそれに基づくパスプラン結果の例. 左図:初期位置より移動しながら4回のステレオ撮像~踏破性解析~軌道 計画を実行した結果. 右図:初期位置より8回目を実行した結果. この図に示した軌道はD\*Liteアルゴリズム[13]を用いている.

に本手法をを用いた自己位置同定結果を示す. 図中, 比較対象のBasic UKFはVOを用いない非線形フィル タの事を指している. これにより, ローカルな対地移 動量がわかるので, カメラで捉えられた岩などを目標 として接近する場合などではDGPSによる絶対位置ベ ースで移動するよりも高い精度が期待できる.

#### 4.2 遠隔操縦制御

従来の火山観測ロボットでは、ロボットと遠隔操縦 者との間の通信は基本的に近距離で、かつ高速である ことが想定されていた[1-3].しかし、観測者の安全を 考えると近距離での高速通信を前提とするのは実用上 問題がある.活動中の火山での安全な距離がどれほど かは、場合によって異なると思われるが、仮に島の火 山の噴火で、島外避難となれば数十キロメートル以上 離れることになる.国内では適法のまま、このような 長距離の通信が行える通信機は得難いため、既存の携 帯電話回線を利用することを考える.携帯電話回線は、 火山地域を含む多くの山間部でも利用が見込める<sup>8</sup>. その一方で回線容量が狭い為、高解像度の動画像転送 や高速なリアルタイム制御は難しい.このため、通信 回線の容量や高速応答性に頼らない遠隔操縦方式を確 立する必要がある.

最も単純な手法はブラインド・ドライブ方式である. 図7に示す様に、ローバからステレオ映像や車体下部 の映像と共に座標、姿勢角、方位角他、太陽電池の発 電量や消費電力量、バッテリ残量等の情報が送られて くる.通信経路が安定していれば、実用的な画質での ステレオ画像の更新レートは約3秒である.遠隔地に いるオペレータはこれらの情報を元に、走行速度、回 頭速度と継続時間を指定して走行させる.なお、画質 を決める圧縮率は遠隔から指示して調整することがで き、必要であれば時間をかけて高画質画像を得ること も可能である.

次にシンプルな操縦手法はウエイポイント座標を指 定したP2P<sup>9</sup>制御である.これは比較的平坦で障害物 の無い場所で有効で,Google Map等の航空写真と, 高精度な自己位置推定があれば利用出来る.

#### 4.3 踏破性解析

ローバがある場所を踏破できるかどうかを検証する 方法として, DEMを拡張したInclined Surface Grid (ISG)マップを用いる[16]. 高さだけではなく,格子 ごとに傾斜角と粗さの情報を持ち,凹凸のある不整地 形をよりよく表現できる.各格子では,重みつき最小 二乗法によって3次元点群から平面フィッティングを おこなって面を推定する.基本的に格子内に存在する 3次元点群から推定するが,ステレオ画像による3次 元点は遠方になるほど疎になるため,実際にはステレ オカメラの誤差モデルを導入し,サンプリング領域の 拡張処理を行っている.

図9に実際にMicro6で走行しながら作成したISGマ ップの例を示す.色が赤くなるほどコストが高く,踏 破性が悪い事を示している.

#### 4.4 自律誘導制御

遠隔地にあるロボットを安全に運用するためには, 周囲地形がどの様になっているか認識する必要がある. 十分な通信経路が確保されている場合は,ステレオ画 像をそのまま転送し,人が立体視を行えばかなりよく わかる.しかし通信経路が不安定な場合は十分な画質 の画像を安定して送ることが難しくなるし,また,走 行時間が長くなれば人もミスを起こす.よってローバ には何らかの自律機能が不可欠であり,特に3次元地 形を解析してローバの安全性を確保することは重要で ある.ここではオンボードで行っている踏破性解析 (Traversability Analysis)[17]とそれに基づく経路計 画について述べる.

ローバはまず、ステレオカメラによって3次元点群 を取得する。十分な精度を持ち、安価で耐環境性を持 つステレオカメラは市場に存在しないため、本ローバ では一般的なWebカメラを用いて自作したものを用 いた。産業用のものと比してレンズが選べず、視野角 が狭いのが弱点だが、安価でも十分な精度が出せるこ とが分かっている[18]. このステレオシステムではロ ーカルサポートとバックマッチングアルゴリズム等の 誤マッチング除去処理とサブピクセル処理を施すこと

<sup>8.</sup>但し、噴火等の非常時にもサービスが継続されるかどうかは 不明である。例えば東日本大震災を例にとると、福島第一原 子力発電所の20キロ圏内では、サービスが継続されている場 所が多いが、中には中断されたままとなっている地域も存在 する[15].この様な地域で本システムを運用する場合は、将 来構想(図1)でも述べているように、中継通信を用いるなど、 情報伝達経路の確保を行う必要がある。

<sup>9.</sup> Point to point 制御. 座標点列を示して, 位置決め制御をする ことで軌道を表す方式. 点と点の間は直線で補間することが 多い.



図10:伊豆大島の裏砂漠で作成した踏破性解析地図、後の遠隔制御で走行したものとは別に試験走行したときのもの、図右手から左に 向かって走行しながら地図を作成した結果である。左右端での差し渡しは約100m。岩や草木のみならず、もっと高低差が小さ い車の轍などもよく認識できていることが分かる.



©Google, Imagery ©2011 GeoEye, Map data ©2011 ZENRIN

図11:Micro6 Volcanoの移動軌跡. 遠隔オペレーションイン タフェース上に表示されたもの. 左上が進行方向. 多く のブッシュを避けて走行した様子がわかる. また、終点 はトレンチの縁にいる様子が窺える. 終点付近は下り坂 が続く地形になっている、この図の軌跡の差し渡しは約 100mである.



図13: Micro6 Volcanoによる気象観測データの一部. すべて携 帯電話回線を通じ、約100km離れた大学キャンパスで記 録したもの. この日(2011年10月17日)の三原山裏砂漠は 天候不順で、一時20m/s近い風が吹いていたことがわかる.

100

80

60

40

20

0

9:00

Level [%]

Battery I



図12: 救出オペレーションで最初に発見された時のMicro6 Volcano. この写真ではトレンチの底にいるように見える が、実際には下り坂の途中で停止している、途中、急な 崖のような地形が何段にも渡って続いている.

Trench bed



3:00

6:00

によって、10 m離れた地点で計測誤差10 cm以下を 確保している.これらにより、一対のステレオ画像か ら2~3万点の3次元点群を得る.画像処理の一例を図 8に示した.この図は高さ地図であり、その地点にお ける高さを表している.

Micro6 Volcanoでは,前節で構築した踏破性解析 地図を用いてD\* Lite[19]またはTheta\*[20]アルゴリズ ムによって経路計画を行っている.D\*はMER等でも 用いられる手法であるが,その経路は隣接する格子の 交点を辿る経路となって最短経路とならない.Theta\* では経路間のある交点に対し,その前後間に直線が引 けた場合に引かれた直線を経路とすることで,目的地 までの最短経路を生成する.これによって移動速度の 遅いローバでも自律移動により効率的に観測領域を広 げることができる.

## 5. フィールド試験

伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムと題して, 無人航空機(UAV)を含む移動ロボットを用いた火山 観測システムの研究会が伊豆大島の三原山において 2009年より実施されている[21]. 筆者らは第1回より 参加しているが,第1回は雨天のため十分な実験が出 来なかった.第2回の2010年は,実用を指向して,太 陽電池により小型のローバMicro5を走行させた.し かしこのローバは充電機能ももたず,十分な遠隔制御 機能も持たなかったため,具体的な成果を上げられな かった.3回目の2011年は,東日本大震災もあり,こ れまでの反省も踏まえ2010年度の設計思想を大幅に 拡張してMicro6 Volcanoを開発した.

開発した Micro6 Volcano を三原山の裏砂漠に持ち 込み,約2週間にわたるフィールド試験を行った. 2011年10月15日に現地入りし,組立と初期調整,夜 間運用のテストを行った後,18日の午後2時頃に水密 パッケージングを済ませて投入した.かねてより島外 からの遠隔制御を目指していたため,ローバを投入後, スタッフ全員が約100 km離れた明治大学生田キャン パスに帰投した.投入した場所は,比較的携帯電話回 線の状態が良好になる三原山東方約3 kmの地点で (これより東側では通信できないことが多かった),ス コリアと呼ばれる多孔質火山噴出物に覆われており軟 弱な地盤となっている.また,周りには比較的背の低 い木が所々にあり、走行の障害となっている.

遠隔操作を行った時に取得したGPSデータを Google Map上にプロットしたものを図11に示す. ロ ーバは図の右下から左上に向かって走行している. 操 作者は(i)ローバより送られてくるステレオ画像を立 体視することで周囲の状況を立体的に確認し,(ii)ロ ーバ下面カメラの映像で車輪接地位置の安全を確認, (iii) Google Map上のプロットでグローバルな位置関 係や,大きな地面構造(トレンチや大きなブッシュな どの障害物)を確認して,ローバに対して走行速度, 回頭速度,継続時間を指定する方式で指示を与えた. これらの情報により,障害物や急坂などは操作者が認 識して避けながら走行することができた. その他も合 わせて直線距離にして約300mの遠隔操縦試験を実施 したが,いずれも安定して走行させることができた.

その一方で、電力の確保は問題だった.まず、これ は後日に判明したことだが、ローバ投入時の水密パッ ケージング作業でのミスで、電源バスに太陽電池が正 しく接続されていなかったことである.また不運にも、 投入直前からその後一週間にわたり、悪天候が続いた ことで、太陽電池の接続ミスが分からなかった.また 分かったところでスタッフは全員島を離れているので どうすることも出来なかったはずである.システムの 信頼性や人為的ミス、またそれを防ぐ手段など、考え るべき事は多い.

前述の様に,投入後も荒天が続いたため(と思われ たが実際には太陽電池が正しく接続されていなかった ため,十分な電流量が得られていない),図11で示す 走行はバッテリを消耗する結果となった.このため, そのわずか2日後に電力が尽きてシステムダウンする 結果を招いた[22].後日,救出オペレーションを行い (図12),ボディを開封したとき,搭載のバッテリ3基 のうち2基が過放電により回復不能の破損状態であっ た.また図13に示す様に現場は15m/sを越える潮風 が吹くことも多く,非常に過酷で表面処理が施されて いないアルミ部品はわずか一週間で白く錆びてしまっ た.さらに現場はとても寒かったため,ボディ内部に は結露が発生しており,電子機器類が危険な状態にあ ったことが分かっている.

図14は,後日,ある日の電力収支である.この日 も残念ながら日照が得られなかった為,午前中こそ電 力需給のバランスがほぼ拮抗しているが,午後は供給 が消費を常に下回っている状態であった.従って,午 後からはバッテリの残量が減り続けている.本来この 様に天候が悪くて発電量が小さい場合は,電力使用量 も減らすべき所だが,この時は電力試験以外の試験を 優先させ,午後になっても試験を続けたためこの様な 結果になった.17時以降は1時間のうち6分間だけ通 信機の電源を入れてヘルスモニタリングを行う夜間モ ードに移行した様子が分かる.

図10に伊豆大島で踏破性解析をしながら走行した (但し自律走行ではなく,手動操作による走行)結果を 示す.大きな岩や草木だけではなく,小さな岩が連続 する荒れ地や,車の走行路となっている轍など,小さ な高低差も捉えて地形評価が行えている様子がよく分 かる.今回のフィールド試験では,様々なトラブルに 見舞われた関係で,踏破性解析結果は遠隔操縦の補助 として人が視認するだけに留まったが,次回の試験で は長距離の自律移動を実現させたい.

## 6. おわりに

本論文では,移動ロボットを用いた新たな火山観測 体制の提案と,火山観測ローバ Micro6 Volcanoの開発, および伊豆大島三原山裏砂漠でのフィールド試験につ いて述べた.大規模な火山の噴火を想定して,ローバ を島に投入し,約100km離れた大学キャンパスから 遠隔操縦により充分走行出来ることが示せた.

しかし、システムはまだ開発途上である.様々な気 象条件の中で何日も夜を越えて生存できることを充分 示せたとは言い難いし、一回あたり100m規模の遠隔 による移動は出来たものの、さらにもっと長距離の移 動が可能であることは示せなかった.また、やはり 100m規模の連続した踏破性解析はできたが、それに 基づくパスプランニングによって自律移動を行うこと も、様々なトラブルに阻まれて今回のフィールド試験 では出来なかった等、課題が多く残っている.その他、 開発途上故の人為ミス併発によるトラブルも経験した.

これらフィールド試験によって得られた経験は非常 に貴重なものであり、次の改善に向けた方向性が明確 になった.本論文執筆時点で既に改良を済ませたもの も多数ある.今後はこの経験を生かしてシステムのさ らなる熟成を行い、実用的な火山観測システムの早期 実現に向けて研究を行って行きたい.

## 謝 辞

本研究は大阪大学の佐伯和人先生が伊豆大島での試 験の機会を提供して下さったことにより大きな進展を みることができた. JAXA/宇宙研の久保田孝先生に はMicro6開発と試験に関して,嶋田貴信氏には宇宙 機用電源管理システム開発に関して多大なるご協力を 頂いた.東芝セミコンダクタ様にはモータ制御チップ のご提供を頂いた.関係各位に篤く御礼申し上げる. なお,本研究の一部は明治大学重点研究費の補助を受 けている.

## 参考文献

- Bares, J. and Wettergreen, D., 1999, Int'l J. Robotics Research 18(7), 621.
- [2] Fong, T. et al., 1995, Int'l Conf. on Env. Systems.
- [3] Muscato, G. et al., 2012, Robotics & Automation Magazine 19(1), 40.
- [4] Muscato, G. et al., 2003, *Int'l J. Industrial Robot* 30(3), 231.
- [5] Crisp, J. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, 8061.
- [6] Kubota, T. et al., 1999, *i-SAIRAS'99*, 273.
- [7] Kuroda, Y. et al., 2008, *i-SAIRAS'08*.
- [8] http://www.intel.co.jp/
- [9] http://www.ubuntu.com/
- [10] http://www.ros.org/
- [11] http://www.arm.com/
- [12] http://japan.renesas.com/
- [13] Sakai, A. et al., 2009, IROS'09.
- [14] Sakai, A. et al., 2010, ISR/Robotik 2010, 1.
- [15] http://www.nttdocomo.co.jp/support/area/
- [16] Saitoh, T. et al., 2010, Advanced Robotics 24(3), 421.
- [17] Gennery, D., 1999, Autonomous Robots 6(2), 133.
- [18] Tamura, Y. et al., 2010, FCV2010, 159.
- [19] Koenig, S. et al., 2005, T. on Robotics 21(3), 354.
- [20] Daniel, K. et al., 2010, J. of Artificial Intelligence Research 39, 533.
- [21] http://astrosis.ess.sci.osaka-u.ac.jp/oshima/symposium. html
- [22] http://www.isc.meiji.ac.jp/~amslab/volcano/