

特集「無人観測ロボット」

無人火山探査車MOVEの開発とその運用課題

後藤 章夫¹，谷口 宏充¹，市原 美恵²

2012年3月30日受領，2012年5月1日受理。

（要旨）危険を伴う火口近傍での噴火観測を可能にするため，我々は無人火山探査移動観測ステーション“MOVE”を開発した。MOVEは土砂災害などの危険がある現場で使われる無人施工型キャリアショベルをベースに，無線の強化や各種観測機材を追加することで作られた。その開発や，阿蘇・伊豆大島の二つの活動的火山で行われた運用試験を通じて，地上型移動観測ステーションを実際の噴火観測に投入する意義や，そのために解決すべき技術面・運用面の問題が具体化された。ここではそれらを報告し，今後の火山探査ロボットの開発と実用化に役立てたい。

1. はじめに

火山噴火に伴って放出される，空振や地震波などの様々な信号は，伝播経路の不均質などにより，もともとの情報が距離とともに失われる。また映像のように，遠方では得るのが困難な情報もある。そのため，観測はなるべく近傍で行われるのが望ましいが，現実には安全確保のため，近傍観測には限界がある。結果的に，安全と思われる範囲でなるべく接近を試みるのが常だが，時として予想を超えた噴火現象が発生しうる。1991年の雲仙普賢岳の火砕流で，外国人火山学者や，警戒に当たっていた消防署員を含む43名が犠牲となったのをはじめ，噴火の最前線で命を落とした人の数は海外を中心に少なくない。

こういった状況から，無人火山探査を実現しようとする試みがいくなされていく。海外では，8本足のDante II [1]が1994年にアメリカで，6輪バギータイプのROBOVOLC [2]が2003年にイタリアで，それぞれ実際の火山をフィールドとして試験が行われている。

国内では著者らのグループにより，平成14年度か

ら5ヵ年計画で実施されてきた科学研究費補助金特定領域研究「火山爆発のダイナミクス」のなかで，無人火山探査移動観測ステーション“MOVE”（Mobile Observatory for Volcanic Explosions）の開発が行われ，以後もその改良が行われた[3]。またこれに触発され，飛行体の“SKY-1”と6輪車の“ほむら”が，それぞれ独立に開発された[4,5]。既製の自律航行型・産業用無人ヘリコプターを用いた火山観測も近年成果を挙げつつある[6,7]。これらは火山学者を中心に開発が進められたが，2010年からは，計測自動制御学会で工学系を中心に，「活火山エリア向け遠隔ロボット技術調査研究会」が発足し，活動中の火山の監視等へのロボット技術の適用の可能性について検討が進められている。

火山無人探査の実現は，防災的な側面とともに，火山噴火のダイナミクスを明らかにする上で極めて有用と考えられる。まず，映像は非常に多くの情報を含み，衝撃波，噴石，火砕流といった地表面現象の速度や広がりをつかえることができるが，距離による不鮮明化や，噴火位置によっては安全な場所から見通せないこともある。加えて，1986年に伊豆大島のカルデラ内外で起こった割れ目噴火のように，思いがけないところから噴火が起こる場合もあるが，移動可能な無人探査機はこういう状況下で威力を発揮する。また爆発的噴火に伴う地表面現象は，その様相や物理的性質が爆発のエ

1. 東北大学東北アジア研究センター

2. 東京大学地震研究所

ak-goto@cneas.tohoku.ac.jp



図1: MOVE のベースマシンMPX10. アームを除いた本体全長はおよそ3.2m. 日立建機株式会社のホームページから転載(現在は閉鎖).



図2: 完成したMOVE. メインカメラはアームの陰で見えていない. 2009年伊豆大島にて.

エネルギー量と深度によって、第一次近似的には支配されていると考えられるが[8], 爆発の物理量と地表面現象とを定量的に結ぶスケリング則の確立に必要な, 火口近傍での変質していない物理情報の取得は, 無人探査でなければ難しい. さらに, 質の低下を犠牲にすれば遠方でも捉えられる映像や物理情報と異なり, 噴石や火山ガスのように, 噴火の現場に立ち入らなければ採取できないものもある. 噴火活動開始初期には, 古い山体構成物が噴出しているだけなのか, 新しいマグマの噴出が起きているかを知ることが, 以後の活動推移を推定する上で重要であるし, 噴火を起こす駆動力である火山ガスの分析は, それがどの深さでマグマから分離したかなど, マグマダイナミクスを理解する上で極めて重要な情報を与える[9]. これらの採取も, 火山無人探査機に期待される大きな役割である.

我々が無人探査を行おうとしているのは地上の火山である. ハイパードルフィンが水深3000 mのブラックモーカーを観察し, マーズローバーが火星表面を走行し, はやぶさがイトカワからサンプルリターンする現在の技術を持ってすれば, 火山は無人探査が比較的容易な対象と思われるかもしれない. しかし火山には火山特有の難しさがある. その一つが噴火は時々刻々変化する現象であることで, そのため予め組まれたプログラムに従っての探査は困難で, 臨機応変な対応が求められる. このことは, 探査機から送られる情報をもとに, オペレーターが探査機を操縦しなければならないことを意味し, 操縦の習熟が求められる. ま

た法律上の制約も, 火山無人探査を困難にする要因の一つにあげられる. その典型が無線で, 出力や周波数帯の制約から, 通信を確保するにはオペレーションサイト(以下, 基地局)をあまり遠方やMOVEを見通せない場所には設置できず, 結果として探査が可能な範囲も制限される.

本論ではまずMOVEの概要について述べ, これまで行ってきた試験の結果と, そこから見えてきた問題点について, 技術面とそれ以外の面について述べる. 特に技術面以外の問題は, 多くがMOVE以外の無人探査機にも当てはまると考えられ, それを明らかにしておくことは火山無人探査の実現に有用である.

2. MOVEの概要

我々のグループはロボット研究の専門家ではなく, また開発にかけられる時間と費用も限られていたため, 遠隔操縦可能な既存の機体を探査車に改造するのが現実的と考えた. これに適したベースマシンとして, 人的被害が懸念される危険な現場で, 遠隔操縦による無人化施工に使われる建設機械が挙げられる. 無人化施工は1969年の常願寺川の富山大橋脚沈下応急復旧工事で, 有線リモコン操縦の水陸両用ブルドーザーが導入されたのが始まりで, 1983年には立山砂防で無線遠隔操縦の油圧ショベルが導入された[10,11]. その後, 1993年から始まった公募による雲仙普賢岳での試験フィールド事業を通して, 無人化施工は実用的な



図3：断熱ボックス内に収められた機器類。MOVEの左と右から見た状態。

工法として確立され、2000年の有珠山及び三宅島噴火後の災害復旧といった火山の現場にも次々と導入された。建設機械の種類も様々で、ブルドーザー、パワーショベル、ダンプなどのほか、崩落面を固めるコンクリート吹き付けロボットも開発されている。さらには従来の建設機械の運転席に取り付けて、遠隔操縦で人間のようにレバーなどを操作する「ロボQ」が開発され[12]、多くの建設機械が無人化施工に対応できるようになっている。2000年に設立された建設無人化施工協会には、ゼネコンや建設機械メーカーの18社が参加している[13]。

いくつかの候補のうち、我々は日立建機製のキャリアショベルMPX10を改造することとした(図1)。MPX10はオペレーターが安全な場所から機体を目視しながら操縦するタイプの、いわば巨大なラジコンカーのような重機で、もともと備えられた特定小電力無線機により、およそ100 mの距離から遠隔操縦できる。これを火山無人探査に利用するため6台のカメラを搭載し、その映像は2.4 GHzのOFDM無線で送ることとした。操縦と搭載機器類操作にはそれぞれ、出力1 Wの小エリア無線を使い、2 km以上遠方からの操縦を目指した。MOVEの位置はGPSによって確認され、その信号はOFDMの音声チャンネルを利用して基地局に届けられ、地図上にリアルタイム表示される。観測中に火砕サージ(火山灰を含んだ高温高速の気流)等に巻き込まれる可能性を考え、操作及び観測のための電子機器類と、その電源のバッテリーは、荷台を外して取り付けた断熱ボックスに収めた(図2, 3)。断熱ボックスは400℃に5分間さらされても内部が60℃以上にならないよう設計され、その耐圧(過剰圧)は



図4：MOVEから送られた走行時のカメラ画像。

0.5気圧である。

6台のカメラのうち、1台はズーム機能を有し、電動の雲台に搭載されている(メインカメラ)。これとアームに取り付けられた1台は、操縦のほか、観測にも用いられる。アームカメラは火口を覗き込むのにも有効である。ほかの4台は視野が固定されており、そのうち1台は傾斜計、パイロットランプ、断熱ボックスの通気口の開閉といった、MOVE本体の状態をモニターするのに用いられている。これらの画像を基地局で受け、適宜カメラを切り替えながらMOVEを操縦する。通常は前方2台とアームカメラ及びメインカメラの画像を1画面に表示した状態で前進する(図4)。

MOVEにはピエゾ型衝撃波センサー、ゲージ型衝撃波センサー、低周波マイクロフォン、差圧計の4種類の圧力センサーが備えられている。センサーごとに得意とする計測圧力範囲や時間スケールが異なり、全体として広い領域をカバーしている。今までに報告さ

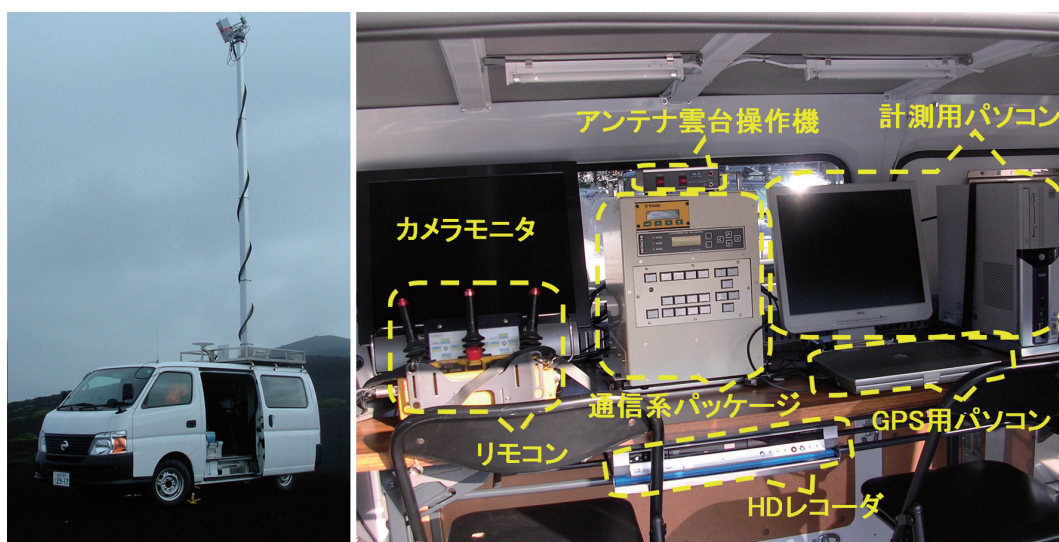


図5：基地局車(左)とその内部(右)。

れている火山性の圧力波や火砕サージの圧力値[14,15]を整理するかぎり、取りこぼしなく収録できると期待される。また、主として火砕サージの温度計測を目的にして、高速応答熱電対も備えられている。これらの温度・圧力情報は、MOVE に装備しているロガーのなかに保存され、基地局でも波形としてモニターできる。またSS 無線を通して基地局から保存データをダウンロードすることもできる。

MPX10のアームにはもともと土砂を掘削・運搬するためのバケットが取り付けられていたが、MOVEでは物をつかむグラブに付け替えられている。これはおもに障害物の排除や、観測機器の設置に使うことを想定しているが、火山弾などのサンプルリターンにも使える。

MOVEは本号に紹介される他の無人観測ロボットに比べ、積載量の多さや堅牢さといった、勝れた点を有する。一方で、不整地走行性は必ずしも高いとは言えない。これはおもに、遠隔操縦での事故防止のため、ベースのMPX10のパワーが車体重量の割に抑えられていることによる。そのためMOVEは基本的に登山道などを走行することを想定されており、結果的に目的地へのルートも制約されることは避けられない。

火口に至るには陸路より空路の方が有効であるという考えもあり、実際そういったアプローチもなされているが[4,7,16]、陸走型探査機には陸走ゆえの利点もある。映像の長時間連続観測や噴出物を火口近傍から持

ち帰ることは、飛行型探査機には必ずしも容易でない。またMOVEには雨天や霧による視界不良を含めた悪天候下での実績もあり、これも陸走型だからこそ成し得たことである。

3. 基地局車の開発

MOVEが開発されてしばらくは、基地局は機材を現地でその都度展開して設営されていた。しかしこれは準備に人手と時間を要するとともに、天候による影響を大きく受けた。またアンテナ設置場所の制限から、通信に最適な地点に基地局を設けられない状況もあり得た。これらの解消を図るため、基地局の機材を搭載した専用の車輛をのちに製作した(図5)。これには上記問題の解決だけでなく、のちに述べるように、電波が地形により遮られMOVEとの通信ができなくなった場合に、基地局が見通しの利く場所に移動することで通信を回復させる狙いもある。

使用した車輛はワンボックスカーのニッサンキャラバン(4ドア標準ルーフ、ロングボディ、2WD、2Lガソリン車)で、これに操縦やデータ取得を行う従来の基地局機能のほか、アンテナを高く上げる伸縮ボールとそれを駆動するポンプユニットを搭載した。ボールの伸長時の高さは車体の荷台分を含めて約8 mである。その先端には映像用の指向性アンテナの方向を変えるために、電動雲台が据え付けられている。ほかの無指

向のものを含め、アンテナ類は全てこの雲台に同架される。車輛の乗車定員は前列分の3名で、それより後ろが基地局のスペースになっている。搭載した機器類の電力は、伸縮ポールを除いて車外の発電機から供給されるが、車体バッテリーから供給される電源を交流100 Vに変換するコンバーターも装備しており、簡単な動作確認などは発電機なしで行える。

4. 実地試験

MOVEはこれまで、日立建機浦幌試験場での性能試験と有珠山近くの牧場で行ったダイナマイト爆発の計測実験のほか、阿蘇山と伊豆大島三原山でそれぞれ2回、噴火観測に向けた実地試験を行ってきた。伊豆大島での試験は、伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムが開催されるきっかけにもなった。

4.1 2004年阿蘇山

最初の実地試験はMOVE完成直後の2004年に阿蘇山で行われた。この時は映像及び操縦系の無線に不具合が生じ、特に遠距離からの操縦は全く叶わなかったが、それでもカメラ映像だけを頼りに火口縁まで前進するのに成功するなど、遠隔操縦に向けて大きな収穫があった。なお、無線の不具合は、空きチャンネルのスキャン不良や雨水浸入が原因とわかり、のちに改善されている。

4.2 2006年伊豆大島

浦幌や有珠山近くでの試験を経て、2度目の実地試験は2006年の伊豆大島で行われた。この時は特定領域研究「火山爆発のダイナミックス」の「火山噴火の長期予測と災害軽減のための基礎科学」を担当するグループと共同で、噴火推移に従って出される指示に基づきオペレートするという、噴火模擬観測を最終目標とした。その10日ほど前に現地入りし、走行ルートや基地局設置場所を検討し、三原山西側の裏砂漠から1986年LB I 溶岩南縁沿いの登山道を通して火口原に通じるルートを選定した。基地局は三原山北東のカルデラ壁上に位置する伊豆大島温泉ホテルに設置した(図6)。模擬観測本番までの間、おもに同じルートを使って操縦訓練を兼ねた動作確認を行ったが、その過程で特に映像無線の通信不良の深刻さが明らかになっ

た(図6)。これは距離の問題より、用いられる電波が2.4 GHzと高周波数で回折性が低いため、基地局から見て物陰に入ると電波が届かないためと考えられる。映像無線のOFDM方式は地上波デジタル放送にも用いられており、反射波が有効に使えることで遮蔽物による電波障害には比較的強いとされている。にもかかわらず火山の現場でその強さが発揮されなかったのは、有効な反射面となる地形や建築物が、MOVEや基地局近傍に得られにくかったためかもしれない。但し模擬観測本番では映像が不安定ながらも通信障害域を通り抜け、山麓と山頂火口原の間を遠隔操縦だけで往復させることに成功した。噴火模擬観測では、操縦者とは別室にMOVEカメラからの画像が映し出され、それに基づくオペレーション指示が操縦者に伝えられた。操縦者はその指示に従い、山頂での噴火映像観測、岩石試料採取、観測機器設置、噴火の激化に伴う撤退など、実際の噴火で想定される動作を行い、MOVEにその実行能力があることが示された。MOVEは基地局から最遠で2.3 kmの地点に到達し、遮蔽物がなけ

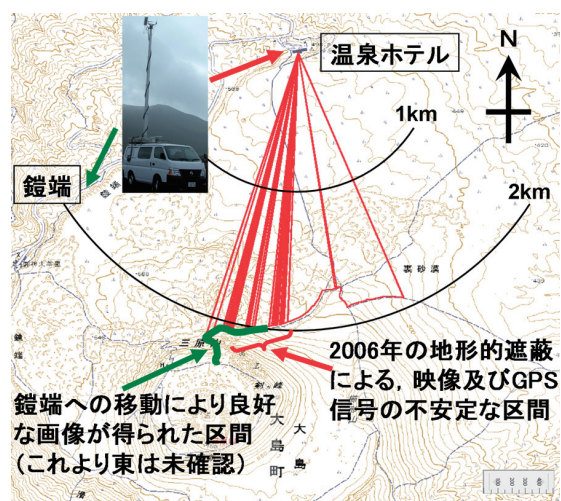


図6：2006年及び2009年伊豆大島試験での基地局位置とMOVE走行ルート。2006年には基地局は温泉ホテルに設けられ、MOVEの走行経路はGPSからの信号で記録された。基地局と経路とが直線で結ばれている区間は、地形障壁によりOFDM無線が一時的に途絶し、その音声チャンネルで送られるGPS信号が届かなかったことを示す。

2009年には、OFDMの受信が困難となったところで、基地局を温泉ホテルから、1.8kmほど西南西のカルデラ壁の上にある林道(鎧端)に移動させた。鎧端からの操縦区間は太線で示されている。この時はMOVE搭載のGPSが故障したため、ハンディGPSの表示から走行範囲を求めた。背景地図データには、国土地理院の電子国土Webシステムから配信されたものを使用。

れば、設計段階で目標としていた2 kmを越えて運用できることが確かめられた。

4.3 2009年阿蘇山

2009年3月、再び阿蘇山で実地試験を行った。これは1回目を実質的に遠隔操縦の試験にならなかったため、さらには新たに導入した基地局車の有効性を確かめる目的もあった。この時は、活発な火口がある中岳の、火口から1 kmほどにある麓の駐車場から遠隔操縦し、MOVEを火口近くまで接近させることを試みた。しかしルートの終盤で小高い丘の陰に道が回り込んだところでMOVEの映像が途切れ、基地局を移動させ運転再開を試みたが、MOVEをさらに10 mほど前進させられるに留まった。但し運用効率の向上には基地局車の導入が絶大な効果を発揮し、それまでは準備や撤収にそれぞれ数時間かかったのが、わずか10～20分ほどで済むようになった。また雪の降る悪天候下でも支障なく操縦ができた。

4.4 2009年伊豆大島

第1回の伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムが開催された2009年10月、現地試験を再度行った。2006年に問題になった映像送信の途絶が、基地局車導入によって解決されるかを確認するのが大きな目的だった。基地局車を温泉ホテルの駐車場に停めての操縦では前回同様、MOVEが溶岩流の陰に隠れるところで映像がつながりにくくなった。そこで車両を温泉ホテルから1.8 kmほど西南西のカルデラ壁の上にある林道(鎧端)に移動させたところ、通信が回復し、その状態はきわめて安定していた。時間の関係でここから電波の届く範囲の確認はできていないが、少なくともこの場所と温泉ホテルの間を移動することで、MOVEを裏砂漠から火口原まで遠隔操縦で確実に到達させられるめどが立った(図6)。このような運用の実現は基地局車の導入なしには困難だった。

4.5 実地試験の意義

4回の実地試験を通じて、我々は課題を一つ一つ解決し、MOVEによる無人火山探査は実用域に近づきつつある。これまでの実地試験は阿蘇山と伊豆大島に限られているが、限られた機会の中では、我々はこれが現実的なアプローチだと考えている。MOVEの走

行性や無線通信の確保しやすさといった技術的な制約も理由の一つだが、操縦には現地の様子の事前把握と、そこでの繰り返しの操縦訓練が不可欠だからである。確実な運用にはルート策定や基地局設置場所の事前検討は欠かせず、これらは植生や建築物の情報が乏しい地図上だけでは十分に行えない。またカメラを通して見る風景は遠近感が肉眼と大きく異なる上、見渡せる範囲も限られる。その先に何があるか十分に把握しない状態での操縦は不可能と言って良い。2006年の伊豆大島で映像無線が不安定ながらも通信障害域を抜けられたのは、その様子がある程度わかっていたからにはかならない。また過去の活動サイクルから考えると両火山は近い将来の活動活発化も懸念され、ここで次の噴火に備えた実地試験を繰り返すことは意義が大きいと考える。

5. 課題と今後の展望

MOVEの開発は困難の連続で、残念ながらその全てが解決されたわけではない。しかし技術面に関しては、半自律走行や優れたヒューマンインターフェースなど、現状を大いに改善すると思われる多くの技術がすでに実用域にあるし、MOVEには難しくても、高い不整地走行性のように、他機種ではすでに克服されていることも多々ある。一方で、法律上の規制など、制度上の問題はMOVEに限らず多くの観測ロボットが直面すると思われ、その解決は必ずしも容易でない。ここではまだ十分な解決策が見つかっていないことや、思いがけない小さな障害で開発が妨げられた例を述べ、今後の開発や、ひいては将来の火山無人探査実用化の一助としたい。

5.1 無線

無線に関する問題は多岐に渡る。まず映像伝送の2.4 GHz帯はMOVEの開発当時に映像用に割り当てられたばかりの周波数帯で、市場に対応機種が十分に回っていないほどの状況だったにも関わらず、実質的にはほかの周波数帯の利用が認められずに採用した。結果として地形的な遮蔽による通信不良に苦勞しているのは先述の通りである。この周波数帯は無線LANにも使われており、それとの混信も問題である。2009年の阿蘇山での試験では、火口近くに設けられた阿蘇

市の出張所と山麓とを結ぶ無線にMOVEの映像無線が原因と思われる障害が発生し、試験を出張所の業務時間外に限定せざるを得なくなった。無線LANは火山観測網のデータ送信にも利用されており、それらへの障害も懸念される。周波数と出力の変更で、干渉の解決と、地形障壁の克服やさらなる伝送距離延長が得られる見通しはある。その状態での免許取得も可能ということだが、免許は試験場所を変えるごとにその地域を管轄する地方総合通信局での取得が必要で、事前の協議に多大な時間と労力を要する。また干渉や混信はこの周波数帯に限った問題ではない。2004年の阿蘇で操縦系の無線が繋がらなかったのは、空きチャンネルを自動スキャンする機能が故障しロックされた状態で、そのチャンネルを他者が先に使うことで回線がふさがったのが原因だった。チャンネル数には限りがあるため、たとえスキャンが正常に行われても、多くの機器が投入されれば、同様の障害や、混信による誤作動が起これないとも限らない。

5.2 基地局車両購入での法的制約

基地局車には思いがけない法的制約が開発の障害になった。予算上の制限と車体に望まれる機動性を同時に満たすため、当初は四輪駆動の中古ワンボックスカーの改造を計画した。しかしこの条件ではディーゼルエンジンの車種しかなく、首都圏への乗り入れ規制条例や、大学にも課せられたグリーン購入法に抵触することから購入が認められず、二輪駆動で環境基準を満たした新車のガソリン車しか選択肢がなかった。そのため悪路には弱く、実用面に不安が残る。

5.3 運用体制

これまでの試験の経験から、噴火現場での実用に当たっては、その運用体制の構築が最大の課題であることを強く感じている。我々を含め、現在観測ロボットを開発している多くのグループが、例えば大学であれば教員2、3名に学生数名(あるいはそういうグループの共同)といった、比較的少人数でそれを進めていることだろう。そのため、機材輸送、事務的折衝、オペレーション、メンテナンスなどといった、ありとあらゆることを一人何役もこなして担わなければならない、個々への負担が非常に大きい。基地局車をマイクロバスなどではなく、狭さを覚悟で普通免許で運転できる

車種にしたのも、特定の人に負担が集中するのを防ぐためである。こういった状況を例えば無人海底探査機「ハイパードルフィン」の運用体制と比べると、その母船である「なつしま」の定員は乗組員28名、ハイパードルフィン運用用員8名、研究者等18名の計55名で[17]、現場だけを見てもその差は歴然である。さらにそれを管理運用する母体組織の有無まで考えると、我々の体制がいかに貧弱であるかがわかる。また運用には事前の訓練が欠かせないことはすでに述べたとおりだが、それらを含めた全てが研究ベースで進められている現状では、多くの人員が十分な訓練を積むにはとても程遠い。

国内での火山探査ロボット開発は10年の歴史しかなく、その運用体制の検討にまで至っていないのは致し方ないかもしれない。しかし宇宙開発にJAXA、海洋探査にJAMSTECがあるように、今後火山無人探査を実用のものとするには、運用組織の確立が望まれる。火山の場合は特に防災という側面もあり、噴火活動が長期化した場合は、観測や監視も長期化することが予想され、それを支える人員の確保は欠かせない。どのような組織が望ましいか、あるいは可能かは今後の検討課題だが、予算と人員が措置され、日常のメンテナンスや操縦訓練が業務の一環として行われるなど、いつでも出動できる体制が整えられることを望みたい。またそれに関する法令も整備され、例えば無線の専用帯域割り当てなどがなされれば、現有の技術をさらに有効に生かせると期待される。

謝 辞

MOVEを製作された日立建機の皆様、計測システムを製作されたIHIエアロスペースの皆様、並びに、実地試験にご協力下さった関係各位に感謝いたします。査読者の中村美千彦教授には有益なコメントを頂きました。本研究には科学研究費補助金特定領域研究(課題番号14080203)及び基盤B(課題番号19310114)を利用しました。

引用文献

- [1] Bares, J. E. and Wettergreen, D. S., 1999, The International Journal of Robotics Research 18, 621.

- [2] Sim, P. et al., 2004, Industrial Robot -AN INTERNATIONAL JOURNAL 31, 189.
- [3] 谷口宏充ほか, 2009, ロボット 187, 10.
- [4] 佐伯和人, 大場武, 2010, 火山 55, 137.
- [5] 金子克哉ほか, 2010, 火山 55, 109.
- [6] Kaneko, T. et al., 2011, Int. Jour. Remote Sensing 32, 1491.
- [7] 金子隆之ほか, 2011, 火山 56, 171.
- [8] Goto, A. et al., 2001, Geophys. Res. Lett. 22, 4287.
- [9] Shinohara, H. and Witter, J. B., 2005, Geophys. Res. Lett. 32, L20308.
- [10] 山元弘, 2007, 建設マネジメント技術6月号, 17.
- [11] 古澤正紀, 2011, NETISプラス 2, 16.
- [12] 藤本昭ほか, 2003, 日本機械学会2003年度年次大会講演資料集(VIII), 209.
- [13] http://www.kenmukyou.gr.jp/f_kaiin.htm
- [14] Valentine, G. A., 1998, Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 87, 1170.
- [15] Taniguchi, H. and Suzuki-Kamata, K., 1993, Geophys. Res. Lett. 20, 89.
- [16] Taddeucci, J. et al., 2007, Eos 88, 253.
- [17] <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/pamphlet/pdf/natsushima.pdf>