

火山噴火による災害と対応について

永谷 圭司 (東北大学)

1. はじめに

1-1 背景

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0の東日本大震災は、それに伴って発生した津波により、主に東北地方の東側沿岸を中心に、未曾有の被害をもたらした。2012年6月現在、東北地方の地震活動は収束の方向に向かって見えるように見えるが、引き続き、関東や南海トラフにおいては、海洋プレートの沈み込みによる地震のエネルギーが蓄積されていると言われており、日本は、引き続き、大地震に対する備えが必要である。

一方、東日本大震災と類似点が多いと指摘されている869年の貞観地震では、この地震の前後に、富士山や鳥海山において大噴火が発生した。また、地震の規模を示すマグニチュードを測定するようになった1900年以降、マグニチュード9.0以上の地震は、いずれも地震に伴う火山噴火が発生しており、現在のところ例外がない(1952年M9.0のカムチャツカ地震では、カルピンスキ他2火山が噴火、1960年M9.5のチリ地震では、コルドンカウジェ他3火山が噴火、1964年M9.2のアラスカ地震では、トライデント&リダウト火山噴火、2004年M9.2のスマトラ沖地震では、タラン&メラビ&ケルト火山噴火。)さらに、大地震と火山異常との間の因果関係についても、数多くの研究報告が行われている[1]。以上より、東日本大震災後の数年以内に、日本国内において、新たな火山噴火が発生する可能性が非常に高いと言える。

1-2 火山災害の分類

火山噴火が発生した際に、大きな災害を引き起こす要因となると懸念されるものとして、噴石・降灰、火砕流、溶岩流、融雪型火山泥流、土石流、火山ガスがある。この中でも、火砕流(図1)は、高温の溶岩の破片や火山灰とガスの混合物が、雪崩のように一丸となって山体斜面を高速で流下する現象(速いもので時速約180km)で、1991年6月3日の雲仙普賢岳の大火砕流では、熱風(火砕サージ)によって、43名が死亡した。火砕流は、それ自体を食い止めることは不可能であるが、その発生を予測することで、人的被害を食い止めることができる。一方、土石流は、火山弾や火山灰が降り積もった斜面に雨が降り、火山灰や火山弾を押し流して下流に大きな被害をもたらすもので、雲仙普賢岳の噴火の後、島原市は、土石流による大きな被害を被った。この土石流に対しても、その発生を予想することで、被害を食い止めることができる。さらに、被害そのものを食い止めるためには、土石流発生が予想されるエリアに砂防ダムを構築することで、民家に到達する前に土石流を食い止めることができる。



図1 雲仙普賢岳における火砕流

1-3 本稿の目的

以上に示した通り、火山噴火は、自然災害の中でも非常に大きな被害を伴うことが多く、また、噴火は、長期にわたって継続することが多いため、遠隔操作型のロボット技術による対応が非常に重要となる。そこで、本稿では、火山災害の分類に応じて、ロボット技術がどのように適用されてきたか、また今後どのような適用が期待されているかを述べる。

2. これまでの火山災害への対応

第1章で示した通り、火山災害を軽減化するためには、状況観察ならびに、砂防工事が必要不可欠である。しかしながら、火山が噴火している最中は、通常、その噴火の規模によって定められる危険区域に人が立ち入ることができない。例えば、浅間山の噴火がレベル3に達した場合、火口から半径4km以内に、人が立ち入ることはできない。また、火山噴火が終息した後も、土石流の懸念から、通常、土石流が発生するエリアでは、人の立ち入りが禁止される。したがって、これらの対応には、遠隔操作を中心としたロボット技術が必要不可欠となる。

前者の状況観察については、現在、噴火の可能性が懸念される火山の火口に監視カメラ、土石流の発生が懸念される箇所にワイヤーセンサや溪流監視カメラを設置し、火山活動が活発となって災害発生の検知に備えている。しかしながら、雲仙普賢岳の噴火の際には、事前に設置していた多くのセンサが、噴火に伴って損傷し、利用できなくなった。また、噴火口や火砕流の発生源となる溶岩ドームがどこに生成されるかは、予



図2 有珠山における自律ヘリコプタ Yamaha R-Max のフライト ([3] より抜粋)

測が難しいため、現在設置されている監視カメラでは、噴火時に対応できるとは限らない。

このような事態に対応するため、現在、GPS 誘導型の無人ヘリコプタによる観察が期待されている。2000年の北海道 有珠山の噴火の際には、立ち入り禁止及び飛行制限区域となっている噴火口周辺の地形や地質状況を観察するため、GPS とビデオカメラを搭載した無人ヘリコプタが投入された。これにより、遠隔地から安全に現場の噴火状況やその周囲の地形変化を確認することが可能となった(図2参照)。しかしながら、飛行時間に制限がある、フライトが天候に大きく左右される、定点観測を行うことが困難である、といった問題がある。また、ここで利用された農薬撒布用の小型ラジコンヘリコプタは、ガソリンエンジンの空気供給や、気圧低下による揚力降下の問題から、1,500m以上の高地での利用が不可能であると言われている。

一方、地表からのアプローチを行う不整地移動ロボットの試験運用も行われてきた。米国では、カーネギーメロン大学(CMU)の不整地移動ロボット Dante および Dante-II による火山探査が行われた [8]。このロボットは、8本足の歩行型ロボットで、テザーで本体を支えながら、Spurr 火山のクレータ探査を行った。また、ヨーロッパでは、イタリアが中心となった ROBOVOLC Project にて、車輪型の火山探査ロボットが構築され、エトナ火山やブルカノ火山で試験運用が行われた [9]。これらの探査により、移動ロボットによる火山探査の可能性を見ることができたが、次の噴火に備えるといった意味においては、実用化に至っていない。一方、日本では、東北大学が火山観測ロボット Mobile observatory for volcanic eruption (MOVE) を開発した(図3参照) [10]。このロボットは、無線操縦型パワーショベルを改造した遠隔操作型ロボットであり、現在、主に伊豆大島において、運用訓練が毎年行われている。

一方、後者の砂防工事に関しては、1990年から始まった雲仙普賢岳の噴火に対し、遠隔操作による試験工事が初めて導入された [5]。具体的な最初の工事は、100m以上の遠隔操作、2~3m 程度の礫の破碎、一時的な温度 100℃、湿度 100% での、土石流発生後の遊砂地等における緊急除石工事であった。その後、無人化施工



図3 火山観測ロボット MOVE の概観



図4 雲仙普賢岳における無人化施工の様子

は実用的な工法として確立され、引き続き雲仙普賢岳の砂防堰堤の構築(図4参照)、2000年に噴火した有珠山における遊砂地の造成、同じく2000年に噴火した三宅島の、砂防ダム建設の前段階としての床固工が無人化施工で実施された。その他、これまでに国内で実施されてきた無人化施工に関する主要な工事については、[6]に概要が紹介されている。さらに、東日本大震災の際に水素爆発を起こした福島第一原発の瓦礫除去に関しても、無人化施工技術が適用された。現在、無人化施工は、国土交通省が取りまとめた情報化施工推進戦略(2008.7.31)の元で、情報化施工技術の一般化・実用化が進められている [7]。これは、ICT 技術を無人化施工に取り入れたもので、CAD データ、GPS、IMU などを利用し、精度の高い無人化施工技術を実現するものであり、今後の技術開発が期待されているところである。



図5 現在の無人化施工の遠隔操作卓

3. 今後 火山環境で期待されるロボット技術

火山災害を軽減化するための砂防工事については、現在、実用化されている無人化施工技術を更に発展させ、より迅速な施工を可能とするための技術開発が求められている。一方、災害予測を行うためには、

1. 標高が高い火山での移動観察
2. 任意の場所での定点火山観察
3. 火山灰の堆積量の移動測定（土石流対策）

といったタスクがロボット技術に求められている。以下に、今後期待される無人化施工技術、移動ロボット技術、飛行ロボット技術、それらに必要な要素技術について述べる。

3-1 無人化施工技術

前章で示した通り、現在、情報化施工推進戦略に沿って、無人化施工技術の研究開発が進められており、遠隔地にいながらも、高度な砂防工事/土木工事が可能となりつつある。一方で、懸念されているのが、オペレータ不足である。現在、要求されるタスクの複雑化に伴い、オペレータに期待される技術も高くなってきているが、現状で、無人化施工建機を遠隔操作できるオペレータの数は限られている。これは、オペレータに、(1) 建設機械の操作が可能であり、(2) 二次元画像情報（ディスプレイ）から現場の状況を予想でき、(3) 時間遅れのある環境で操作を行う、という能力が求められているためである。現在のオペレーションルームの様子を図5に示す。今後、現場の状況をいかにオペレータに伝えるか、といったヒューマンインタフェースの改良や、通信遅れが存在する環境における遠隔操作手法の研究開発が、解決すべき重要な技術課題となると考えられる。

3-2 飛行ロボット技術

現在、実用化されている災害対応用自律型飛行ロボットは、ガソリンエンジンで動作する農薬撒布用の中型ラジコンヘリコプタを改造したもの（図2参照）である。この種の機体は、比較的ペイロードが大きく、また、搭載したガソリンの量に応じて、長時間の飛行にも耐えられる。しかしながら、標高が高い場所では、空気の密度低下に伴う揚力降下、ならびに、エンジンに十分な空気が送れなくなるための推力低下が生ずるため、現在の運用は、標高1,000m程度までである。しか



図6 飛行ロボットと小型移動ロボットによる観測シナリオ

しながら、噴火活動が懸念される山は、浅間山で標高2,568m、活動中の新燃岳も標高1,420mと、標高の高い場所が多い。現在、エンジンの改良により、1,500m程度の飛行が可能であると言われているが、今後は、電気をエネルギーとするモータ式ヘリコプタによる探査や、固定翼を用いた自律飛行ロボットによる移動観察についても視野に入れ、研究開発を進める必要がある。

3-3 移動ロボット技術

災害予測を行うための、火山環境における定点観測や、火山灰の堆積量の移動測定は、いずれも、自律型のヘリコプタで実施することが困難であるため、地表移動を行う不整地移動ロボットによる実現が求められている。これらを実現するための課題は、数多く存在するが、対象とする環境が、比較的大きな岩も存在する軟弱不整地であるため、大きな問題となるのが不整地移動技術である。

不整地移動能力、特に障害物の踏破能力は、そのサイズに依存するため、大型のロボットが望ましい。実際、火山探査を行ったDante-II[8]は、ロボットのサイズが3.7m × 2.3m × 3.7mで、重量が770kgと非常に大きくて重い。無人化施工機械も、基本的には建設機械であるため、重量は数百キログラムとなる。これに対し、エネルギー効率や可搬性を考えると、探査ロボットはできるだけ小型であることが望ましい。そこで、東北大学と千葉工大のチームでは、小型レスキューロボットを改造した筐体を利用した火山探査用不整地走行ロボットの走行性能向上に関する研究を進めている。現在、浅間山などのフィールドにおいて、20kg～40kg程度の小型ロボットを利用した不整地走行試験を進めており、今後の活用が期待されている[11]。

一方、小型移動ロボットと飛行ロボットを組み合わせた観測シナリオについても、検討が進められている。図6は、このシナリオのイメージであるが、飛行ロボットによって運ばれたロボットによる定点観測/移動観測を目指している。このシナリオには、飛行ロボットのペイロードの問題や、小型移動ロボットの走行性能の問題等、解決すべき問題は多々存在するが、今後期待されるシナリオである。

3.4 要素技術：動力源

無人化施工技術の建設機械に利用するエンジンは、主にディーゼルエンジンであり、その燃料は軽油である。そのため、軽油を搭載した分だけ、機械は稼働することができるが、通常は、毎日、メインテナンスも行うため、稼働した無人化建設機械を現場から待機場場に帰す必要がある。また、空中移動を行う災害対応用自律型飛行ヘリコプタは、ガソリンエンジンを搭載しているため、こちらもガソリンを搭載した分だけ稼働することができるが、1時間程度の飛行が限界である [4]。

一方、電動モータで駆動するロボットについては、動力源の問題は更に大きくなる。現在、[11] に示した移動ロボット Quince は、リチウムイオン電池を搭載し、稼働時間が2時間～4時間程度である。現状では、このロボットを利用して火山探査を行うには、バッテリー容量が十分ではない。

火山探査で期待される長期（数日から1ヶ月）の定点観察には、やはり、その場でエネルギーを生成する太陽電池パネルを利用したシステムが重要であると考えられる。そこで、移動ロボット台車で観測地点まで移動し、台車本体のエネルギーが喪失しても、上部に搭載した太陽電池パネルを利用して、観察システムのみを長期活動させる、といったシナリオが、現在検討されている。

3.5 要素技術：長距離無線通信技術

無人化施工技術の実現では、無線通信が大きな問題であったと報告されており、現在も、如何に安定した無線通信を提供できるか、といった研究が進められている。一方、実用化されている空中移動ロボット（ヘリコプタ）については、無線通信を常時確立せず、GPS誘導による自律移動をベースに考えられてきた。また、福島原発に投入された移動ロボット Quince は、原子炉建屋内の無線通信が困難であったため、有線通信（メタルケーブル）によって遠隔操作を実現した。いずれにしても、遠隔操作型の移動ロボットは、何らかの方法で通信を確立する必要があり、そのための技術が大きなネックとなっている。

無線通信技術に関し、今後ブレークスルーとなり得るのが、メタマテリアル・アンテナである [14]。メタマテリアルとは、自然界に存在する通常の材料が持たない電磁気的性質を、人工的に持たせた材料と言う意味であるが、この技術を利用することで、アンテナを小型化することが可能となる。近年、このアンテナ技術を搭載した無線 LAN ルータも発売されるなど実用化も進んでいるため、今後期待される技術である。

一方、無線通信に関連して、現在話題となっているのが、アナログ TV 帯域跡地の周波数帯の利用である。2011 年にアナログ方法が終了し、その跡地である VHF 帯（90MHz～222MHz）や UHF 帯（710MHz～770MHz）の利用方法が議論されているが、その中に、防災・災害予測及び防犯用データ無線システムを入れたいという議論が進められている。これらの周波数帯は、遮蔽物に対して強く、移動体通信に適していると言われているため、今後の移動ロボット用無線技術として期待したい。

4. おわりに

本稿では、火山噴火による災害に対し、ロボット技術がこれまでどのように適用されてきたか、また今後どのような適用が期待されているかを述べてきた。特に、無人化施工技術、飛行ロボット技術、移動ロボット技術、動力源、無線通信技術について、現状と今後期待される技術について述べた。今後、ロボット技術が、火山噴火によって起こる災害を軽減するための、大きなけん引力となることを期待したい。

参考文献

- [1] 小山真人, “火山で生じる異常現象と近隣地域で起きる大地震の関連性”, 地学雑誌, vol.111, no.2, pp.222-2322, 2002.
- [2] 大角 恒雄, 浅原 裕, 下川 悦郎, “野尻川における土石流振動特性の変化に関する一考察”, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2008.
- [3] 佐藤 彰, “自律飛行無人ヘリコプタによる有珠山火口付近の観測”, YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW, 2000.
- [4] 中西弘明, 井上 紘一, 佐藤彰, “被災地における空からの情報収集技術の確立”, 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.5, pp.546～549, 2004.
- [5] 供田英一, 岩崎肇, 岡本仁, “赤松谷川9号床固工工事における無人化施工”, 建設の施工企画 第8巻, pp.14-20, 2010.
- [6] 古澤正紀, “無人化施工に見る技術開発の歴史～情報化施工技術・ICTの先駆けとなった各種の取組み～”, NETIS プラス 第2号, pp.16-23, 2011.
- [7] 情報化施工推進会議, “情報化施工推進戦略【概要版】”, <http://www.mlit.go.jp/common/000020668.pdf>
- [8] John E. Bares and David S. Wettergreen, “Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned”, The International Journal of Robotics Research, Vol.18, No.7, pp. 621-649, 1999.
- [9] Daniele Caltabiano, Danilo Ciancetto, Giovanni Muscato, “Experimental Results on a Traction Control Algorithm for Mobile Robots in Volcano Environment”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.4375-4380, 2004.
- [10] 後藤 章夫, 谷口 宏充, 市原 美恵, “無人火山探査車 MOVEの開発とその運用課題”, 日本惑星科学会誌「遊・星・人」, Vol.21, No.2, pp.103-110, 2012.
- [11] 永谷圭司, 桐林星河, 他, “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回システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.54-57, 2011.
- [12] Keiji Nagatani, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, et al, “Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots”, Journal of Field Robotics, accepted and to be published, 2012.
- [13] Keiji Nagatani, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, et al, “Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots”, Journal of Field Robotics, accepted and to be published, 2012.
- [14] 佐藤 和夫, 村松 潤哉, 飯塚 英男, “4. メタマテリアルを利用した移動通信アンテナの指向性制御 (小特集) 新世代通信技術を見据えたメタマテリアルの現状”, 電子情報通信学会誌, Vol.93, No.6, pp.452-456, 2010.