解 説

火山防災に求められるロボット技術

Robot Technology Required for Volcanic Disaster Prevention

皆 川 淳* *国際航業株式会社

Jun Minagawa* *KOKUSAI KOGYO CO., LTD.

1. は じ め に

日本には 111 の活火山が存在しており、そのうち 50 の活火山が気象庁の常時観測火山として 24 時間観測の対象となっている。噴火発生時は、噴火警戒レベル上昇に伴い、火口近傍や土石流などの流下予測範囲に対して災害対策基本法に基づく警戒区域が設定され、長期的に人の立入が制限される。そのため、今までも立入制限区域では、無人航空機（以下、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）とよぶ）を使用した調査（例えば 2014 年箱根山噴火）や、無人化施工重機を用いた対策工事（例えば 1990 年からの雲仙普賢岳噴火）が実施されてきた。

火山防災に求められるロボット技術は、火口近傍で発生する現象を調査するための技術と、土石流などの流下想定範囲で災害復旧や対策工事を行うための技術があり、前者は大学など研究機関、後者は国土交通省によって、主に開発が進められてきた。同じ火山防災のための技術といっても、「立入制限区域外から火口近傍を調査するロボット技術」と「火山山麓で対策工事を行うロボット技術」では、現地条件やニーズも異なると考えられる。よって、本稿では、2 章で火山防災対策と火山災害の概要を整理し、3 章で各ロボット技術に関して火山地域で想定される現場条件と今までの技術開発から得られた課題、4 章で今後期待される技術をまとめてみたい。

2. 火山防災対策と火山災害の概要

2.1 火山防災対策の概要

災害の要因となる火山現象には、噴石・降灰、火砕流、融雪型火山泥流、溶岩流、火山ガスなどがある。また、火山噴火により噴出された降灰などが斜面に堆積することで発生する土石流がある [1]。火山防災対策を効果的に実施するためには、進行中の火山現象の種類、規模、到達範囲などを迅速に把握したうえで、今後の推移や影響範囲を予測する必要がある。

実際の防災対策としては、気象庁や大学研究機関などの火山監視情報を基にした噴火警戒レベルや自治体などから

構成される火山防災協議会が作成する火山防災マップを基にした警戒避難活動、および国土交通省や各都道府県の砂防部局による火山噴火緊急減災対策などによる緊急ハード・ソフト対策などが実施されている。なお、噴火警戒レベルは令和元年 12 月時点において、常時観測火山の 50 火山のうち、48 火山で運用されており、これらの火山で立入制限区域が設定された場合は、調査や工事の安全確保のため、ロボット技術が有効となる。

2.2 火山災害の要因となる現象

以下に、各火山災害の概要と影響範囲予測に必要な現地情報例を示す。これらの情報は、火口近傍でしか取得できないことも多いため、「立入制限区域外から火口近傍を調査するロボット技術」を活用することが想定される。

1) 噴石

噴石は、噴火により火口から岩塊が高速で吹き飛ばされる現象で、避難までの時間的猶予がほとんどない。2014 年 9 月に発生した御嶽山の噴火では火口周辺の登山客 63 名（不明を含む）が犠牲になった。影響範囲予測では、噴火のエネルギーを推定するため、噴石の大きさと火口からの到達距離などを迅速に把握することが重要となる。

2) 火砕流

火砕流は、図 1 に示すように、噴火により放出された破片状の固体物質と火山ガスなどが地表に沿って流れ下る現象で、時速 100 [km] 以上、温度数 100°C に達することがある。1991 年 6 月に発生した雲仙普賢岳の火砕流では 43 名（不明を含む）が犠牲となった。複数ある火砕流のタイプのうち、雲仙普賢岳のような溶岩ドーム崩壊型といわれる火砕流タイプでは、溶岩ドーム体積とその想定崩壊土量などが把握できれば、規模推定の一助となる可能性がある。

図 1 雲仙普賢岳の火砕流 [1]

原稿受付 2019 年 12 月 24 日

キーワード: Volcanic Eruption, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Unmanned Construction

*〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1

*Fuchuu-shi, Tokyo

図2 ネバデルルス火山の融雪型火山泥流 [1]

図3 雲仙普賢岳の土石流 [1]

3) 融雪型火山泥流

融雪型火山泥流は、火砕流の熱などにより火山を覆う雪や氷が溶かされることで発生し、火山噴出物と水が混合して地表を流れ下る現象で、時速数十 [km] に達し、図2に示すように、山麓を広範囲に流下することがある。1926年5月の十勝岳の噴火では144名（不明を含む）が犠牲となった。影響範囲予測では、積雪深と積雪密度を把握し融雪水量を推定することなどが重要となる。

4) 溶岩流

溶岩流は、火口から噴出したマグマが地表を流下する現象であり、ほかの現象よりも速度が遅いため人命が失われる可能性は低いが、建物が焼失するなどの被害が発生する。1983年10月の三宅島噴火では約400棟の家屋が埋没、焼失した。影響範囲予測では、流れやすさや規模を推定するため温度や組成、噴出率などを把握することが重要となる。

5) 火山ガス

火山ガスは、火山活動により地表に噴出する高温のガスで、水、二酸化硫黄、硫化水素、二酸化炭素などを主成分とし、吸引すると気管支の障害や中毒が発生する。火山ガスは平常時に登山客や温泉作業員などが吸引して亡くなる事例も多く発生し、近年の事例でも、2015年3月に秋田駒ヶ岳の乳頭温泉近傍で温泉作業員3名が犠牲となっている。影響範囲予測では、火山ガス噴出位置、噴出量、成分などの把握が重要となる。

6) 降灰などを起因とした土石流

降灰などを起因とした土石流は、降灰などの火山噴出物が不安定土砂となると同時に斜面の浸透能を低下させることで降雨による表面流が増加して発生する。1991年以降の雲仙普賢岳では山麓に堆積した降灰や火砕流堆積物が降雨により流出することで大規模な土石流が繰り返し発生し、図3に示すように、多数の家屋が流出した。影響範囲予測では、降灰などの分布や堆積厚や堆積構造、および雨量の把握などが重要となる。なお、降灰などを起因とした土石流は、平成23年5月に土砂災害防止法の改正に伴い、「河床勾配10°以上の流域のおおむね5割以上に1 [cm] 以上の降灰が堆積し、その下流におおむね10戸以上の家屋が分布する場合、国土交通省が緊急調査を実施し、被害が想定される区域と時期を関係市町村に提供する」[2] ことが義務付けられている。

以上に示した情報などから、各現象の影響範囲を予測し、警戒避難活動を実施する。一方で、被災の恐れがある範囲で緊急対策を実施する場合は、「火山山麓で対策工事を行うロボット技術」が活用されることになる。

3. 火山地域の現場条件と既往ロボット技術の課題

3.1 火口近傍を調査するロボット技術

1) 現地条件

調査対象となる火口近傍は、離島などの一部の火山を除き1,000 [m] 以上の標高に分布することが多い（例えば、御嶽山で3,067 [m]、雲仙岳で1,359 [m]）。さらに、噴火警戒レベル3までの規制範囲は、その火口を中心に最大半径4 [km] 程度に設定されることが多いため、往復距離で8 [km]、比高で数百 [m] 以上の遠方まで操作、および通信可能な技術が必要となる。そのため、現状ではUAVを用いた調査が一般的になっている。また、標高が高いことや離島などの地域特性から、風速10~15 [m/s]、気温-20°C程度の条件下でも運用できる技術が望まれる。

2) 既往ロボット技術

火口近傍の無人観測機として、2002年には無線操作型ショベルカーをベースとした遠隔操作型無人観測装置 MOVE が開発され、伊豆大島などでテストが行われた [3]。この機体は、2 [km] の通信距離を有し、ペイロード900 [kg] 斜度26°までの登坂を可能とし、可動基地局車を開発して運用性も高めたが、通信技術や無線に対する法定制約や運用人員の確保などの課題から2013年に運用を終了している [4]。陸上移動型の無人調査車はペイロードが大きく、様々な観測装置を搭載することや、耐熱・耐衝撃性を高めることが可能であるため、試料サンプリングや観測機器設置など様々な応用が想定される。しかし、実際に運用するためには、火口近傍に接近できるルート確保、走行性、通信技術、および運用体制構築などが課題である。

一方で、UAVを用いた火口近傍の観測手法は、カメラなどの観測装置を搭載し、空中から観測を実施する使用法と、観測装置や試料運搬の手段としての使用法が実施されている。前者の例として、2000年有珠山の噴火時には、エンジン駆動シングルロータ型のUAV（以下、「無人ヘリ」とよぶ）を用いて、空中からの降灰や土石流堆積物の調査が実施された [5]。2007年にはイタリアのブルカノ火山におい

て、ペイロード 3 [kg] 程度の電動マルチロータ型 UAV（以下、「ドローン」とよぶ）を用いて二酸化硫黄ガスの測定が行われた [6]。また、後者の例として、2011 年霧島新燃岳噴火後や 2015 年口永良部噴火前に無人ヘリで、火口周辺に地震計などを設置した事例や、2016 年に西ノ島で船上から無人ヘリを離発着させて岩石試料の採取が実施された [7]。これらの実施結果から、各種計測やセンサ運搬設置を実施するための飛行距離やペイロードの向上、多様なセンサを付け替えられる機能、より遠距離まで安定して通信可能な技術、UAV の離発着場の事前選定の必要性などが課題として挙げられている。

3.2 火山山麓で対策工事をするロボット技術

1) 現地条件

施工場所は溪流内や谷出口付近であることが多く、地形が狭隘かつ樹林帯などを有する場合は、無人化施工重機を操作するための通信条件が悪くなる。また、冬季施工で路面が凍結した場合は施工性が低下する。

2) 既往ロボット技術

雲仙普賢岳では、火砕流が到達する危険性がある立入制限区域内で除石、掘削作業が必要とされたことから、遠距離でも操作可能な無人化施工技術が開発された。当時の要求技術水準では、100 [m] 以上の遠隔操作が可能であった [8]。有珠山では災害時の臨機の措置として大出力の建設無線（2 [W]、操作系として 420 [MHz]、映像系として 2.4 [GHz]）の免許を受けて 1.2 [km] 離れた場所から施工を行った [9]。その後、GPS などの測位技術と合わせて出来形管理をする情報化施工方式や、無線 LAN を使用して広範囲で無人化施工が実施できるネットワーク型方式へと発展した。一方で、有人施工と比較して施工性が低下する点、継続的な施工現場の少なさを要因とした技術者不足などが課題とされる [10]。その他、北海道の樽前山、十勝岳では定期的に冬季の無人化施工訓練を実施しており、燃料の凍結、遠隔操作による路面凍結でのスリップやサイクルタイム低下、アンテナへの着雪による通信障害、継続的な人材育成の必要性などが課題として挙げられている [11]。

4. 今後期待されるロボット技術

近年では、UAV の飛行距離の向上や複数枚の空中写真から対象形状を復元する Structure from Motion (SfM) 技術の市販ソフトにより、三次元モデルを容易に作成することが可能となった。2014 年箱根火山噴火や 2018 年草津白根山噴火では、図 4 に示すように、ドローンによる火口近傍の降灰分布把握などを目的とした画像撮影が実施された [12]。

しかし、火口近傍の計測においては、強風の影響で計測できるタイミングが限られることや、地形精度を向上させるために必要な評定点を設定することが難しいことが課題となる。今後は、強風下でも長距離を安定して飛行できる UAV や、準天頂衛星システムなどを活用して位置情報精度が向上した UAV の開発が望まれる。さらに、短時間に広範囲を計測するために複数機体を同時かつ安全に運行する技術や墜落時に迅速に位置を確定できる技術があることで、

図 4 2014 年箱根火山噴火時の火口近傍空撮画像

図 5 UAV で運搬可能な監視機器の事例（調査ユニットを立入規制区域に運搬し LoRa を用いてデータを伝送）[13]

図 6 UAV で運搬可能な小型ロボットと運搬機構 [15]

円滑な調査や緊急対応が可能になると考えられる。

また、UAV のペイロード向上、省電力広域無線通信方式 (LPWA) などの通信技術の発展、計測センサ小型化により、立入規制区域内に観測機器を運搬・設置することで、リアルタイムデータを取得することが可能になりつつある。例えば、降灰を起因とした土石流に関しては、図 5 に示すように、火口近傍の降灰厚さを 1 [cm] の精度で計測する小型センサや降灰厚計測用スケールを火口近傍まで UAV で運搬・設置して計測する技術が検討されている [13] [14]。UAV や通信技術の向上やセンサ開発により、多様なセンサを運搬・設置できるようになることが期待される。

さらに、UAV で小型ロボットを運搬して火口近傍で計測位置を調整しながら調査する技術の検討も行われている [15]。この技術は、既往の大型無人調査車で課題だった火口近傍までのアクセスルートに対する解決策の一つである。具体的には、図 6 に示すように、土石流の予測や発生検知に必要な降雨量や土砂移動の振動を検知する雨量計や振動センサを搭載した小型ロボットを UAV から懸架したキャリアで

運搬し、キャリアから遠隔操作でロボットを降ろした後に観測地点に移動し長期観測を実施する。観測終了後は、再度 UAV が現地にキャリアを運搬し、小型ロボットを遠隔操作しキャリアに誘導することで回収する。今後は、各種センサの開発、UAV 運搬時の安定性の向上、小型ロボットの操作性、耐久性の向上、低価格化などを図ることで、観測項目や機器設置地点の自由度が大幅に向上される可能性がある。

無人化施工に関する技術としては、次世代通信規格である 5G の特徴である低遅延、大容量通信、多数同時接続を活用した技術の開発試験が始まり、火山地域においてもローカル 5G などの導入による作業効率や安全性の向上が期待される。

5. お わ り に

火山現象は多様で発生メカニズムなどがよく分かっていない点も多い。そのため、ロボット技術を活用して火口近傍の観測を行うこと自体が火山現象を理解することや火山防災に役立つ貴重な情報になる。実際に、2015 年口永良部島の噴火では、前年の噴火により山頂付近の観測装置が壊滅したため、無人ヘリにて山頂付近に地震計を設置した結果、山麓観測点では検知できない微小地震の急増が噴火前に観測されている [16]。さらに、観測情報は、国土交通省が構築している火山噴火リアルタイムハザードマップシステム [17] の計算条件に逐次反映することで避難範囲推定の精度向上につながる事が期待される。

火山噴火は豪雨や台風などに比べて低頻度かつローカルな災害のため技術の継続性と予算確保が難しく、観測技術や機器の維持管理が大きな課題となっている。そのため、平常時は必要最低限の観測機器で監視をしつつ、火山活動が活発化した場合はロボット技術を活用して緊急的に観測網を強化することで、維持管理費を抑えるなどの対応も想定される。UAV で各種センサや小型ロボットを運搬する手法は、設置地点の選定や設置方法、観測機器の電源・データ通信方法、運用体制の構築など課題も多いが、5G 規格導入やクラウド活用と合わせて火山観測のあり方に大きな変化を与える可能性がある。

謝 辞 火山防災に関するロボット技術について助言をいただいている東京大学の永谷圭司教授、工学院大学の羽田靖史准教授、(株)イームズラボ、国際航業(株)の担当各位に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 気象庁：主な火山災害，<https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/>

- data/tokyo/STOCK/kaisetsu/volsaigai/saigai.html
- [2] 国土交通省：土砂災害防止法の概要，<http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/linksinpou.html>
- [3] 後藤，谷口，市原：“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，no.21，pp.103-110，2012。
- [4] 後藤，谷口，市原：“無人火山探査移動観測ステーション“MOVE”開発の総括”，日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿集，SHV49-02，2013。
- [5] 佐藤：“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，no.31，pp.44-47，2001。
- [6] A.J.S. McGonigle, A. Aiuppa, G. Giudice, G. Tamburello, A.J. Hodson and S. Gurrieri: “Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes,” *Geophys. Res. Lett.*, L06303, 2007.
- [7] 大湊，金子，小山，渡邊，安田，武尾，青木，柳澤，本多，梶原，神田，為栗，風早，篠原：“無人ヘリによる火口近傍観測の進展”，*Conductivity Anomaly 研究会論文集*，pp.43-58，2018。
- [8] 松井：“雲仙普賢岳における無人化施工について”，*新砂防*，no.47，pp.51-53，1994。
- [9] 青野：“有珠山噴火災害復旧工事における無人化施工”，*建設機械*，3月号，pp.20-25，2003。
- [10] 田村，大内田，堀之内，伊野，松井，山本：“雲仙における無人化施工技術の発展と今後の課題”，第 61 回砂防学会研究発表会概要集，Pb-87，2012。
- [11] 吉川，北清，村上：“十勝岳火山砂防における冬季無人化施工現地試験について”，第 61 回北海道開発技術研究発表会，2018。
- [12] 小松澤，田村，石北，風間，田中，萬徳，藤本，松井，長野，安海，江藤，櫻井，森本：“UAV を用いた火山噴火時の緊急調査について”，第 67 回砂防学会研究発表会概要集，Pb-196，2018。
- [13] 堤，山田，山本，家田，佐渡，荒木，高橋，潮見，相澤，河野：“火山噴火時に立入困難地域の状況把握のため遠隔調査ユニットならびに UAV を用いた運搬手法の開発への取り組み”，第 67 回砂防学会研究発表会概要集，p.204，2018。
- [14] 金崎，森山，島田，手束，永田，皆川，金井，永谷，矢島，伊豆：“火山噴火時における土石流発生区域に関する無人調査手法の開発”，第 66 回砂防学会研究発表会概要集，R4-15，2017。
- [15] K. Nagatani, S. Kiribayashi, R. Yajima, Y. Hada, T. Izu, A. Zeniya, H. Kanai, H. Kanasaki, J. Minagawa and Y. Moriyama: “Micro-unmanned aerial vehicle-based volcano observation system for debris flow evacuation warning,” *Journal of Field Robotics*, vol.35, pp.1222-1241, 2018.
- [16] 京都大学防災研究所・東京大学地震研究所：火山噴火予知連絡会拡大幹事会資料(平成 27 年 5 月 30 日)，http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/kakudai150530/4_kyodai.pdf
- [17] 国土交通省：火山噴火リアルタイムハザードマップシステム，http://www.mlit.go.jp/report/press/sabo01_hh_000070.html

皆川 淳 (Jun Minagawa)

2002 年東北大学大学院理学研究科地学専攻修了。技術士(応用理学部門，建設部門)。パシフィックコンサルタンツ(株)，(一財)砂防地すべり技術センター出向を経て 2014 年より国際航業(株)勤務。火山噴火緊急減災対策，火山ハザードマップ検討など，火山防災全般に従事。「ドローンを用いた火山噴火時の土石流予測システム」にて 2018 年第 8 回ロボット大賞国土交通大臣賞受賞(団体受賞)。